



TITLE:

# 行動主体の認知過程を考慮した交通システムの動的挙動に関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

中山, 晶一郎

---

CITATION:

中山, 晶一郎. 行動主体の認知過程を考慮した交通システムの動的挙動に関する研究. 京都大学, 2000, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2000-03-23

URL:

<https://doi.org/10.11501/3167306>

RIGHT:

# 行動主体の認知過程を考慮した交通システムの 動的挙動に関する研究

1999年12月

中山 晶 一 朗

# 目次

第1章 緒論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本研究のアプローチ	3
1.3 本論文の構成	4
第1章 参考文献	7
第2章 交通ネットワークにおける均衡概念	9
2.1 ネットワーク均衡の概念	9
2.2 利用者均衡	10
2.2.1 ナッシュ均衡と利用者均衡	10
2.2.2 混合ナッシュ均衡	10
2.3 確率的利用者均衡	12
2.4 合理的期待均衡	12
2.5 ネットワーク均衡の動的化	13
2.5.1 時間帯別ネットワーク均衡	13
2.5.2 動的利用者均衡	13
2.6 ネットワーク均衡の特徴と役割	14
第2章 参考文献	16
第3章 交通システムの動態と行動主体の学習過程	19
3.1 解析モデル	19
3.2 シミュレーション	20
3.3 室内実験	22
3.3.1 室内実験の特徴	22
3.3.2 既往の室内実験	23
3.4 実地調査および実地実験	24
第3章 参考文献	26
第4章 認知過程と限定合理性	29
4.1 限定合理性	29
4.1.1 限定合理性と手続的合理性	29
4.1.2 認知過程の考慮の必要性	29

4.2 記憶から見た認知過程	31
4.2.1 記憶モデルの概要	31
4.2.2 短期記憶と作動記憶	32
4.2.3 長期記憶と知識構造	32
4.2.4 記憶と限定合理性	33
4.3 プロダクション・システム	34
4.4 帰納と学習	35
4.4.1 演繹的推論	35
4.4.2 帰納的推論と学習	35
第4章 参考文献	39
第5章 複雑系及びその解析のための方法論	43
5.1 複雑系	43
5.1.1 複雑系の研究	43
5.1.2 複雑系の種類	45
5.1.3 カオスが示した複雑性	45
5.2 シミュレーション	46
5.2.1 シミュレーションとは	46
5.2.2 シミュレーションの目的	46
5.2.3 シミュレーションの特徴	47
5.2.4 一つの研究形態としてのシミュレーション	47
5.2.5 シミュレーションにおける方法論	48
5.3 複雑系としての社会システム	49
5.3.1 認知過程の単純性と行動の複雑性	49
5.3.2 認知的限界の緩和と複雑性	49
5.3.3 社会システムのシミュレーション	51
5.4 本研究における交通システムへの視点と研究アプローチ	51
5.4.1 複雑系としての交通システム	51
5.4.2 本研究におけるシミュレーション・アプローチ	52
第5章 参考文献	56
第6章 行動主体の経験の蓄積と交通システムにの挙動	59
6.1 経験の蓄積による学習過程の記述	59
6.1.1 モデル化のアプローチ	59
6.1.2 遺伝的アルゴリズムの概要	59
6.1.3 遺伝的アルゴリズムを用いた学習モデルの妥当性	61

6.2 シミュレーションモデルの概要	62
6.2.1 経路選択モデル	62
6.2.2 交通流モデル	66
6.3 数値実験	66
6.4 結果の考察	70
6.4.1 思い込み均衡	70
6.4.2 交通システムの複雑さ	71
第6章 参考文献	90
第7章 行動主体のヒューリスティクスと交通システムの挙動	91
7.1 不確実性下におけるヒューリスティクスと経路選択	91
7.2 シミュレーションモデルの概要	91
7.2.1 経路選択モデル	92
7.2.2 交通流モデル	95
7.3 数値実験	95
7.4 結果の考察	99
7.4.1 利用者均衡の成立の有無	99
7.4.2 交通システムの時間的不可逆性	100
第7章 参考文献	110
第8章 行動主体の帰納的学習と交通システムの挙動	111
8.1 帰納的学習と経路選択	111
8.1.1 本章の目的	111
8.1.2 経路選択における帰納	111
8.2 シミュレーションモデルの概要	112
8.2.1 経路選択モデル	112
8.2.2 交通流モデル	115
8.3 数値実験	116
8.3.1 利用者均衡との比較	116
8.3.2 帰納的学習の停止	119
8.3.3 思い込みと習慣化	120
8.4 結果の考察	123
8.4.1 交通行動における思い込みと凍結	124
8.4.2 行動主体の認知過程	125
8.4.3 交通システムの複雑さ	125
第8章 参考文献	134



第 9 章 結論	135
9.1 本研究で得られた成果	135
9.2 本研究が示した交通システム分析のための視点	137
9.2.1 認知過程の考慮	137
9.2.2 複雑系としての交通システム	138
9.3 今後の課題	139
第 9 章 参考文献	140

# 第 1 章 緒論

## 1.1 研究の背景と目的

交通計画の立案や交通政策の検討のためには、単に予測が出来るのみならず、交通システムにおけるメカニズムや諸性質を解明し、様々な交通現象を明らかにすることが必要であろう<sup>[1]</sup>。

交通システムのフローの取り扱いに関しては、従来、そして現在もなお、ネットワーク均衡の概念が大きな役割を果たしている。ネットワーク均衡は、Wardrop (1952) の第一配分原則においてその基本的な概念が提示されることから始まり、最適化問題としての定式化、需要変動型モデルの開発、そして、近年における動的化や土地利用モデルとの統合化と、研究が精力的に進められている (e.g. 松井他, 1998)。

ネットワーク均衡を用いて交通システムを解明しようとする交通システムの均衡分析 (以下、均衡分析) は、交通システムを均衡という一つの「状態」によって記述するものであると言える<sup>[2]</sup>。均衡分析におけるこのようなアプローチは、動的で複雑な交通システムを我々が理解できる系、言い換えると、解析的に取り扱える程の単純な系として定式化を行うというものである。これにより、均衡分析では、理論を演繹的に展開することにより、交通システムを統一的・体系的に取り扱うことが可能となり、これまで、我々が交通システムに対する洞察を深めることに大きく寄与してきた。

しかしながら、均衡分析では、その理論の拡張とは裏腹に、その前提である均衡の成立の是非に関しては言及されることは少なく、それが十分に検討されたとは言い難い。また、そもそも、均衡という一つの「状態」によって交通システムを記述することが適切であるのか、という問題も議論されることは多くない。

交通システムにおける行動主体が十分に学習すると、どの行動主体も行動を変更する動機を持たない均衡状態に収束すると推測することは非常に「常識」的な考え方のように思われる。しかし、これらの問題は、憶測の域で語られるべきものではなく、また、均衡分析以外では、交通システムを理論的に取り扱う方法論は存在しないという理由によって十分な検討を避けることもできないものである。これらの問題が十分に検討されていない現状は、均衡分析がその限界を超えて、「盲目」的に用いられる危険性を孕んでいるとは言えないだろうか。均衡分析を適切に用い、そこで得られた結果を正しく解釈するためには、均衡分析の限界を明らかにすることが必要であり、特に、交通システムにおいて均衡が成

立するのか、均衡という一つの状態によって記述することが適切であるのか、という問題を十分に検討することが必要であると考えられる。

均衡分析の大きな問題点の一つは、正に、交通システムを均衡という一つの「状態」として記述することであると考えられる。均衡分析は交通システムを「状態」として記述するのみで、そこへ至る「プロセス」を取り扱うことは出来ない。十分に時間が経過すれば均衡が成立するとしても、交通システムを取り巻く環境が常に変化することを考えれば、交通システムは均衡に収斂することではなく、常にその過程の中にあることになり、均衡を取り扱うことは意味をなさない (Simon, 1959; Goodwin, 1998)。すなわち、均衡が成立するとしても、単に均衡という状態を記述するだけでは十分ではなく、その「プロセス」をも記述する必要がある<sup>[3]</sup>。

また、行動主体に対する完全合理性の仮定もしくは効用最大化仮説の設置も均衡分析の大きな問題点の一つであると考えられる<sup>[4]</sup>。完全合理性や効用最大化仮説は理想化された人間の行動を記述するための概念であり、現実の人間行動に対してそれを適用することはできない。均衡分析では、このような仮定を設けることによって行動主体の行動が効用が最大化された一つの「状態」として記述され、同時にシステム自体も均衡という一つの「状態」として記述されることになる。したがって、以上のような均衡分析の問題点に対処するためには、行動主体に対して限定合理性を仮定し、その認知の「プロセス」(認知過程)を考慮した上で交通システムの「プロセス」を記述することが重要であると考えられる。

本研究では、均衡分析の限界を明確にするために、さらに、均衡分析と異なる新しい視点から交通システムを捉えるために、交通システムにおける「プロセス」、特に行動主体の学習を中心とする認知過程によって生じる day-to-day dynamics に焦点を当てる。つまり、本研究は、行動主体が行動を決定する過程、すなわち、認知過程を記述することを通じて、交通システムの「プロセス記述」を行うものである<sup>[5]</sup>。これは、均衡分析が「状態」として交通システムを記述することとは対照的である。また、このようなアプローチは、均衡分析がシステムをできるだけ単純に取り扱おうとするのに対して、均衡分析が単純化のためにその記述を捨象した「複雑性」(complexity)に焦点を当てるものである。近年、複雑系というものに対して関心が高まっているが (Waldrop, 1992)、上で述べた「プロセス記述」は交通システムを複雑系とみなして、それを記述することを意味すると考えられる。

以上のことをまとめると、本研究の目的は次のようになる。本研究では、交通システムを「プロセス」という視点から捉えることによって、交通システムにおいて均衡は成立するのか、また、均衡という「状態」によって記述することが適切であるのか、という問題を検討するとともに、「状態記述」を行う均衡分析によって捉えることの出来ない交通シ

ステムのメカニズムや諸性質を明らかにする。これらのことを通じて、交通システムの「複雑性」を解明し、交通システムを捉えるための従来までと異なった枠組みを構築することを試みる。また、本研究では、それらの研究を行うための方法論についても若干の考察を行う。これらが本研究の目的である。

## 1.2 本研究のアプローチ

交通システムに関する研究を行う場合、特に交通システムにおいて均衡は成立するのか、というような問題を検討する場合、当然のことながら、現実の交通システムを詳細に観測することが必要である。しかし、交通量などのマクロ的指標を観測することでは、均衡が成立するのか、という問題を検討することは困難であると考えられる。その理由は、交通環境が常に変化している上に、問題に関わる要因の全てをある精度をもって観測することは極めて困難であるためである。統計的な手法を駆使したとしても、十分に検討することは困難であろう。また、交通システムにおけるメカニズムや様々な交通現象を考察する場合において、マクロ的指標の観察によって、要因間の相関関係等を解明することは可能ではあるが、行動論的な根拠持つという観点からは、それだけでは説得力のあるモデルを構築することは困難であると考えられる。

交通システムは交通行動の集積から形成されており、ミクロ的な交通行動自体を詳細に分析することも、その解明のためには、一つの重要かつ有用なアプローチである。現に交通行動分析は交通工学における中心的な研究分野の一つである。交通行動分析は、ロジット・モデルなどの離散選択モデルから始まり、アクティビティ分析、パネルデータや時間利用データの解析などにより、交通行動の解明はこれまでに飛躍的に進んだ (e.g. 北村, 1996)。しかし、本研究のようにマクロな現象をも対象としなければならないような場合、単に交通行動を詳細に研究するだけでは十分な分析を行うことは出来ない。それは、一般に、非線形な相互作用が生じるシステムにおいては、その全体は部分の総和以上であり、個々の部分を調査するだけでは全体を理解することは出来ないからであり (von Bertalanffy, 1971) <sup>[6]</sup>、個人に関して、いくら豊富な知見が蓄積されたとしても、それだけでは個人の集合としてのマクロ的な交通現象を解明することは出来ない<sup>[7]</sup>。つまり、交通行動分析の結果を単純に集計するだけでは交通システムのメカニズムを解明することはできない。

以上のように現実の交通システムや交通行動を観察することは重要ではあるものの、本研究の目的に対しては、それは必ずしも適切ではない。本研究の目的にとって、シミュレーションも一つの有用なアプローチであると考えられる。シミュレーションでは、学習を

考慮した行動主体の行動および行動主体間の相互作用を容易にモデル化することが出来るため、創発現象を含んだ交通システムのマクロな現象を記述することが可能となる。また、そのような相互作用の中で、個々の行動主体の学習を含んだ行動決定過程（認知過程）における諸変数を観測することも出来るため、交通システムにおけるマクロ的な現象を記述することが出来るのみならず、マクロ的現象を個々の行動主体のミクロな行動から説明することが可能となる。したがって、本研究では、シミュレーションによって交通システムにおける諸現象を解明することにする。

しかし、当然のことながら、シミュレーションによる研究だけでは十分ではなく、実際のシステムにおける実証的研究も必要であることは言うまでもない。シミュレーションによって明らかになった諸知見に対する実証的分析を行うことによって、シミュレーションによる交通システム解析を裏付けることが必要である。既に述べたように観測データの分析という直接的なアプローチからだけでは交通現象を解明することは困難であるが、実証的データに裏付けられたシミュレーションモデルによって種々の交通システムにおける現象を解明することは可能であると考えられる。

### 1.3 本論文の構成

本論文は 9 章から構成される。

第 2 章では、本章でも触れたネットワーク均衡について説明する。第 2 章で述べるようにネットワーク均衡モデルは、シミュレーション・モデルに対して、ノルム（基準）としての役割を果たすと考えられる。第 2 章では、これまでに発表された主なネットワーク均衡に関して整理するとともに、本研究で構築したシミュレーション・モデルに対してノルムとなるネットワーク均衡を提案する。

本研究では、既に述べたように、行動主体の学習過程を考慮した上で交通システムの挙動を考察する。本研究で対象となる交通システムの dynamics は、day-to-day dynamics である。第 3 章では、交通システムにおける day-to-day dynamics に関する既往の研究に関して整理する。

本章で述べたように、均衡分析において、交通システムを均衡という「状態」として記述することができるのは、行動主体の行動に対して効用最大化もしくは完全合理性を仮定しているからである。つまり、このような仮定を設けることによって行動主体の行動自体が、効用が最大化された「状態」として記述することが可能となり、その集積である交通システムも「状態」として記述することができる。しかし、人間の合理性は完全ではなく、

限定されたものである（Simon, 1947）。第 4 章では、限定合理性の概念について説明するとともに、そのような行動主体の行動の記述には認知過程を考慮することが必要であることを説明する。そして、人間の認知過程に関して、これまで認知心理学における研究から記憶システムを中心に整理する。

行動主体の認知過程を考慮した交通システムは、均衡分析のように一意な均衡解を持つという静的で単純なシステムではなく、動的で複雑なシステムとなると考えられる。第 5 章では、近年、注目を浴びている複雑系およびその解析に用いられるシミュレーションに関して整理するとともに、本研究における基本的な方法論について検討する。

第 6 章から第 8 章では、交通システムに関するシミュレーション・モデルを構築し、分析・考察を行う。

第 6 章では、第 2 章で述べるような従来までの行動主体の知覚旅行時間（予測旅行時間）モデルに遺伝的アルゴリズムを適用することによって発展させたモデルを構築した上で、交通システムや経路選択行動の挙動に関して考察する。

不確実性下においては、人間は簡便法とも言えるヒューリスティクス（heuristics）を用いるとされる（Tversky & Kahneman, 1974）。したがって、経路選択時において、必ずしも知覚旅行時間を算出した上で経路選択を行うとは限らないと考えられる。第 7 章では、そのようなヒューリスティクスを考慮した経路選択モデルを構築した上で、交通システムや経路選択行動の挙動に関して考察する。

第 8 章では、第 4 章で述べる認知過程における「帰納」（Holland et al., 1988）に基づいた経路選択モデルを構築し、交通システムや経路選択行動の挙動に関して考察する。

最後に、第 9 章において、本研究において得られた知見を整理し、結論をまとめ、今後に残された課題を示す。



- [1] 本研究の対象は主に自動車交通を想定している。しかし、以下の議論は鉄道などの他の交通にも拡張することが可能である。したがって、本論文では、交通ネットワーク、交通システムという用語を用いることにする。
- [2] 均衡は必ずしも一意であるとは限らないが、代表的なネットワーク均衡である利用者均衡 (user equilibrium) や確率的利用者均衡 (stochastic user equilibrium) はその一意性が示されている (e.g. Sheffi, 1985)。
- [3] ここで注意すべきことは、ネットワーク均衡の分野で現在研究されている動的化と本論文で述べられる「プロセス」とは全く異なる概念であることである。ネットワーク均衡での動的化は、需要変動と同時に均衡が連続・離散的に変化することであり、均衡が形成される「プロセス」を記述するものではない。したがって、均衡研究における動的は、「プロセス」の観点からは、本質的には静的なものと言える。
- [4] Simon (1996) は、複雑なシステムの主要な記述方法として、状態記述 (state description) とプロセス記述 (process description) の2種類があると述べている。本章の「プロセス記述」という術語は Simon (1996) から借用したものである。
- [5] 本論文での効用最大化仮説および効用最大化は、行動主体の認知過程が全く考慮されていない、伝統的に経済学で用いられる仮説を指す。
- [6] 同様の指摘は経済学の分野においてもなされており、それは「合成の誤謬」と呼ばれている。Samuelson (1976) によると、合成誤謬とは、一部分について真であることが、そうであることだけのゆえに、全体についても必然的に真であるとみなすことによる誤謬である。
- [7] このように部分が非線形な相互作用を行うことによって部分によっては説明することの出来ない上位レベルの現象が発生することは「創発」(Polanyi, 1966; Klee, 1984) や「ミクロ・マクロ・リンク」(Alexander & Giesen, 1987) と呼ばれる。当然のことながら、この上位レベルの現象は、下位レベルのミクロ的な行動の境界条件となる。

- Alexander, J. C. and B. Giesen (1987) From Reduction to Linkage: The Long View of the Micro-Macro Link, Alexander, J. C. et al. (Eds.) The Micro-Macro Link, University of California Press, Berkeley, pp.1-68. (石井幸夫他訳 (1988) ミクロ・マクロ・リンクの社会理論, 新泉社, 東京.)
- von Bertalanffy, L. (1971) General System Theory: Foundation Development Applications, Allen Lane the Penguin Press, London. (長野敬, 太田邦昌訳 (1973) 一般システム理論: その基礎・発展・応用, みみず書房, 東京.)
- Goodwin, P. B. (1998) The End of Equilibrium, Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling, Gärling, T. et al. (Eds.), Pergamon Press, Oxford, pp.103-132.
- Holland, J. H, K. J. Holyoak, R. E. Nisbett and P. R. Thagard (1986) Induction- Processes of Inference, Learning, and Discovery, MIT Press, Cambridge. (市川伸一他訳 (1991) インダクションー推論・学習・発見の統合理論へ向けて, 新曜社, 東京.)
- 北村隆一 (1996) 交通需要予測の課題: 次世代手法の構築に向けて, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp17-30.
- Klee, R. L. (1984) Micro-Determinism and Concepts of Emergence, Philosophy of Science, Vol.51, pp.44-63.
- 松井寛編著 (1998) 交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解法ー, 土木学会, 東京.
- Polanyi, M. (1966) The Tacit Dimension, Peter Smith, Gloucester, Massachusetts. (佐藤敬三訳 (1980) 暗黙知の次元: 言語から非言語へ, 紀伊国屋書店, 東京.)
- Samuelson, P. A. (1976) Economics, 10th Ed, McGraw-Hill, New York. (都留重人訳 (1977) 経済学 上, 岩波書店, 東京.)
- Sheffi, Y. (1985) Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Simon, H. A. (1947) Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Process in Administrative Organization, Macmillan, New York. (松田武彦, 高柳暁, 二村敏子訳 (1965) 経営行動: 経営組織における意思決定プロセスの研究, ダイアモンド社, 東京.)
- Simon, H. A. (1959) Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science, American Economic Review, Vol.49, pp.253-283.
- Simon, H. A. (1996) The Sciences of the Artificial, 3rd ed., The MIT Press, Cambridge. (稲葉元

- 吉・吉原英樹訳（1999）システムの科学，パーソナルメディア出版，東京．）
- Tversky, A. and D. Kahneman (1974) Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, Science, vol.185, pp.1124-1131.
- Waldrop, M. M. (1992) Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, Simon & Schuster, New York.（田中三彦・遠山峻征訳（1996）複雑系，新潮社，東京）
- Wardrop J. G. (1952) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proceedings the Institution of Civil Engineers Part II, pp.325-378.

## 第2章 交通ネットワークにおける均衡概念

交通システムのネットワークに関する研究の中心は，いわゆる交通量配分問題である．交通量配分問題では，「均衡」の概念が大きな役割を演じている．以下では，前章でも触れたネットワークにおける均衡（以下，ネットワーク均衡）について説明する．

### 2.1 ネットワーク均衡の概念

交通システムにおける諸現象を理論的に解明しようとする場合，ネットワーク均衡の概念を用いることが多い．ネットワーク均衡は，Wardrop (1952) の配分原則から始まったとされ，Beckmann et al. (1956) や Jorgensen (1963) などがそれを最適化問題として定式化することによって，数理的に取り扱うことができるようになった．

Wardrop (1952) は，1) 起終点間に存在する経路のうち，利用される経路の旅行時間は全て等しく，利用されないどの経路の旅行時間よりも小さい，2) ネットワーク上の総旅行時間は最小となる，という二つの交通配分原則を定義した．1) は Wardrop の第一原則，等時間原則あるいは利用者均衡（UE: User Equilibrium）配分などと呼ばれる．これは，ドライバーが自己の経路選択行動を最適化した結果到達する均衡状態を表すものであるため，交通システムの記述モデルとされる．一方，2) は Wardrop の第二原則，総走行時間最小原則あるいはシステム最適配分と呼ばれ，交通システム全体についての最適化を図ったものであり，交通システムの規範モデルとして用いられる．また，第二原則は，第一原則の定義の（平均）旅行時間を限界旅行時間に置き換えることによって，数学的等価であることが知られている．

利用者均衡が成立するためには，1) 全ドライバーは旅行時間を最小化しようとする，2) ドライバーは利用可能な経路に関して完全な情報を得ている，という前提条件が満たされていなければならないと想定されることが多い<sup>[1]</sup>．ここでの完全な情報とは，他者の行動を確定的に知るということ，言い換えると，経路の旅行時間を事前に一秒も変わらず正確に知っているということであると考えられる．しかしながら，行動主体はこのような正確に旅行時間を「知覚」するとは考えにくく，Daganzo & Sheffi (1977) や Fisk (1980) は，ランダム効用理論を用いて，確率的利用者均衡（SUE: Stochastic User Equilibrium）配分あるいは時間比原則と呼ばれるネットワーク均衡を定式化した．

以上が通常用いられる基本的なネットワーク均衡もしくは交通量配分のあらましである。

## 2.2 利用者均衡

ネットワーク均衡の概念のうち、最も基本的かつ重要なものは利用者均衡であろう。本節では、利用者均衡をゲーム理論の観点から考察し、さらに、新たなネットワーク均衡の概念を提案する。

### 2.2.1 ナッシュ均衡と利用者均衡

利用者均衡は、ゲーム理論から見ると、ナッシュ均衡である（Charnes & Cooper, 1958）。ナッシュ均衡とは、Nash (1951) によって定義されたゲーム理論における解概念であり、次のように定式化される。行動主体を  $i (= 1, 2, \dots, N)$ 、各人がとる行動戦略の集合を  $S_i$  とし、行動戦略の組  $s = (s_1, s_2, \dots, s_N)$  が行動主体  $i$  にもたらす利得を  $\pi_i(s)$  と表わすと、ナッシュ均衡は以下の式を満たす行動戦略の組  $s^*$  として定義される。

$$\pi_i(s^*) \geq \pi_i(s_i, s_{-i}^*) \quad \forall i \quad \forall s_i \in S_i \quad (2.1)$$

ここで、 $(s_i, s_{-i}^*)$  は、行動主体  $i$  だけが与えられた戦略  $s^*$  から離れた状態、 $(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_N^*)$  を表わす。ナッシュ均衡は、相手の戦略が与えられたとするならば、各人の行動戦略が互いに最適な戦略となった状態のことを指す。

利用者均衡は、「起終点間に存在する経路のうち、利用される経路の旅行時間は全て等しく、利用されないどの経路の旅行時間よりも小さい」とされ、「どの行動主体ももはや経路を変更することによって自己の旅行時間を小さくすることができない状態」と言い換えることができる。これは上で示したナッシュ均衡の定義に当てはまり、利用者均衡がナッシュ均衡であることが容易に分かる。

### 2.2.2 混合戦略ナッシュ均衡

個々の行動主体がどの行動（戦略）をとるのかということまで考慮に入れると、ナッシュ均衡である利用者均衡は多数存在することになる。この場合、どの均衡が成立することになるのかは明らかではなくなる。このように複数のナッシュ均衡が存在する状態は、行

動主体が合理的に自らの行動を一つに絞り込むことが出来ない状態である。このような時、行動主体  $i$  は確率的な行動をとる、すなわち、混合戦略  $\sigma_i (\in \Sigma_i)$  をとることが考えられる。いずれかの行動（戦略）がその行動主体にとって有利なものであるとするならば、行動主体はその行動をとるため、混合戦略ではどの行動（戦略）からも得られる利得の期待値は等しくなる。全ての行動主体がこのような混合戦略  $\sigma^* (= \sigma_1^*, \dots, \sigma_N^*)$  をとる場合、次式を満たす混合戦略ナッシュ均衡が成立する。

$$\pi_i(\sigma^*) \geq \pi_i(\sigma_i, \sigma_{-i}^*) \quad \forall i \quad \forall \sigma_i \in \Sigma_i \quad (2.2)$$

ここで、 $(\sigma_i, \sigma_{-i}^*)$  は  $(\sigma_1^*, \dots, \sigma_{i-1}^*, \sigma_i, \sigma_{i+1}^*, \dots, \sigma_N^*)$  を表わす。

ある経路  $j (j = 1, 2, \dots, M)$  の交通量  $q_j$  に対する旅行時間  $t_j$  を旅行時間関数  $f_j(q_j)$  によって算出することができるとする。このとき、混合戦略ナッシュ均衡におけるネットワーク均衡では、交通量  $q_j$  は確率変数となる。各行動主体が同質であるとする、全ての行動主体は同じ行動（混合戦略）を採用するであろう。混合戦略を経路選択確率  $p_j$  によって表すと、ある行動主体が経路  $j$  を走行するのかは、確率  $p_j$  で 1、確率  $(1 - p_j)$  で 0 をとる確率変数  $X_j$  によって表わすことが出来る。そして、確率変数である交通量は、 $q_j = N \cdot X_j$  となる。混合戦略ナッシュ均衡におけるネットワーク均衡では、以下の式を満たす状態である<sup>[2]</sup>。

$$E[f_j(q_j)] = E[f_k(q_k)] \quad \forall j \quad \forall k \quad (2.3)$$

ここで、 $E[\cdot]$  は期待値である。式 (2.3) を満たす  $\bar{q}_j^*$  は、 $\bar{q}_j^* = N \cdot p_j^*$  が成立しているため、混合戦略  $p_j^*$  が容易に求められる。 $N$  人の行動主体がそれぞれ経路  $j$  を確率  $p_j^*$  で選択する結果である交通量  $q_j^*$  は二項分布  $\text{Bin}(N, p_j^*)$  に従う。このとき、その平均値は  $N \cdot p_j^*$  であり、分散は  $N \cdot p_j^* \cdot (1 - p_j^*)$  となる。また、旅行時間関数  $f_j(\cdot)$  は、一般に非線形であるため、混合戦略におけるネットワーク均衡の  $q_j^*$  と利用者均衡における経路交通量とは必ずしも一致しない。

このような混合戦略におけるネットワーク均衡は、進化論ゲームにおける進化的安定戦略（ESS: Evolutionarily Stable Strategy）（Maynard Smith & Price, 1973）となっている。進化的安定戦略は、次のように定義されている。全ての有り得る戦略  $\sigma$  に対して、 $\pi_i(\sigma^*) \geq \pi_i(\sigma_i, \sigma_{-i}^*)$  であり、この不等式がある  $\sigma (= \sigma^*)$  に関して等式が成立するならば、その  $\sigma$  に対して、 $\pi_i(\sigma_i^*, \sigma_{-i}^*) > \pi_i(\sigma_i, \sigma_{-i}^*)$  が成立する。旅行時間関数が狭義に単調増加関数であるという条件の下では、上述の混合戦略におけるネットワーク均衡は進化的安定戦略となる。



利用者均衡では主体の行動の不確実性が考慮されておらず、経路の旅行時間の不確実性に関する指標を何も提供しない。一方、混合戦略ナッシュ均衡はその不確実性を考慮したものであり、経路旅行時間の分散値を提供するものである。したがって、上述の混合戦略ナッシュ均衡によるネットワーク均衡を行動の不確実性を考慮した場合の利用者均衡と考えられる。

## 2.3 確率的利用者均衡

ランダム効用理論に基づいた経路選択行動によるネットワーク均衡の概念が確率的利用者均衡（SUE: Stochastic User Equilibrium）である。確率利用者均衡は、利用者の知覚には確率的な誤差が含まれるとした場合のネットワーク均衡の概念であり、「どの行動主体も自分が一方的に経路を変更することによって、自分の知覚旅行時間を減少させることが出来ない状態」とされる。ここでの確率的な誤差は、利用者間の異質性、知覚における誤差、観測者が観測することの出来ない要因などとして解釈されるべきものであろう。この誤差項は学習等によって変化するものではないため、利用者の旅行時間に関する不確実性と解釈することは出来ない（飯田，1992）。一方、前節で述べた混合戦略ナッシュ均衡におけるネットワーク均衡は、行動主体の行動の不確実性を考慮したものとなっている。

以上のような確率利用者均衡は最適化問題を解くことによって得ることが可能であり、その解には一意性が保証される（e.g. Sheffi, 1985）。また、確率利用者均衡では確率分布のパラメータの極限をとったものは利用者均衡となるため、利用者均衡を一般化したものとも考えられる。

## 2.4 合理的期待均衡

小林（1990）は、不完備情報（Harsanyi, 1967-1968）の下におけるネットワーク均衡の概念を提案している<sup>[3]</sup>。これは、合理的な主体の長期的な学習行動の結果、その主観的な期待（予測）分布は客観的なそれと一致するという合理的期待仮説（Muth, 1961; Lucas, 1978）を用いたネットワーク均衡である。ネットワークにおける合理的期待均衡は、利用者均衡では取り扱うことの出来ない行動主体の旅行時間に対する不確実性を考慮したものとなっている<sup>[4]</sup>。利用者均衡では、行動主体の期待は確定値として客観値と一致する一方、合理的期待均衡では行動主体の期待は不確定であり、その分布が客観的な分布と一致する。

すなわち、合理的期待均衡は、利用者均衡では確定的であった旅行時間を分布値に置き換えたものとみなすことができる。また、確率的利用者均衡は、行動主体が交通量の平均に関して合理的期待を形成するモデルと解釈できる（小林，1990）。

ネットワークにおける合理的期待均衡は、合理的行動という枠組みの中で、旅行時間の不確実性を内生的に取り扱うことが出来る点にあると考えられ、情報提供に関しては、この枠組みにおいて理論的な研究が行われている（小林・井川 1993；小林等，1995）。

## 2.5 ネットワーク均衡の動的化

前節までに説明したネットワーク均衡モデルは、ネットワーク・フローの定常性等を仮定したものであり、時間の進行を全く考慮しない静的なモデルである。それに対して、本節では時々刻々と変化するネットワーク・フローを取り扱うことが可能なネットワーク均衡を紹介する。

### 2.5.1 時間帯別ネットワーク均衡

時間帯別ネットワーク均衡とは、利用者均衡に基づいて時間帯別に交通量を配分するネットワーク均衡であり、Beckman 型の最適化問題として定式化することができる（藤田等，1988）。時間帯別ネットワーク均衡は、前の時間帯の残留交通量を考慮する点において動的であり、半動的なモデルとも言える。このモデルの特長は、大規模なネットワークに適用することができる実用性である。

### 2.5.2 動的利用者均衡

動的交通量配分モデルは、時々刻々と変動する需要交通量を対象とする配分モデルである。それは静的なモデルにおけるシステム最適と利用者均衡に対応した2種類に分類できる。

システム最適配分に対応する動的モデルは動的システム最適配分（DSO: Dynamic System Optimal）と呼ばれ、Merchant & Nemhauser (1978) の研究に始まる。

利用者均衡に対応した動的配分モデルには、動的利用者最適（DUO: Dynamic User Optimal）と動的利用者均衡（DUE: Dynamic User Equilibrium）の2種類が存在する。前者は、Wie et al. (1990) などが定式化した配分モデルであり、「任意に時点について、その

時点におけるネットワーク・フローから算出される現在旅行時間が等しくなる配分」と言える<sup>[5]</sup>。後者は、「任意の OD 間の経路に関して、目的地に到達するのに要した時間が等しくなる均衡配分」であり、Smith (1993) や赤松・桑原 (1994) などが定式化を行っている。

## 2.6 ネットワーク均衡の特徴と役割

前章で述べたように、ネットワーク均衡の概念は交通工学の発展に多大な貢献を果たしてきた。これは、均衡分析においては、交通システムを記述するネットワーク均衡を解析的に取り扱うことができ、理論を演繹的に進めることが可能であるため、交通システムを系統的・統一的に捉えることが出来たことが一つの大きな要因になっていると考えられる。このようにネットワーク均衡は交通システムを解析的な取り扱いが可能となるような均衡という一つの「状態」として記述することが可能であるのは、行動主体に対して効用最大化仮説もしくは完全合理性の仮定を設けているからである。このような仮定を設けることによって行動主体の行動自体が効用の最大化された「状態」として記述することが可能であり、その集積である交通システムも「状態」として記述することが可能となる。効用最大化仮説もしくは完全合理性の仮説は第4章で述べるように理想化された人間の行動を記述するものであり、本来現実の人間の行動に適用することができないものである。このような仮定を設けてはいるものの、ネットワーク均衡は、ネットワーク・フローの研究において必須な交通状況と交通行動の相互作用を考慮したものであり、前章で述べたミクロ・マクロ・リンクを記述したものである。したがって、ネットワーク均衡は人間の行動の集積として意味の持つ概念として多くの人々から受け入れられている。

ネットワーク均衡は上述のように主体の行動に対して理想的な仮定を設けているが、交通システムを系統的・統一的に捉えることが可能である。したがって、様々なモデルを構築することができるシミュレーション・モデルに対して、ノルム（基準）やベンチマークとしての役割を果たすと考えられる（赤松，1996）。

注

- [1] ここで注意すべきこととしては、前提条件 1) と 2) は利用者均衡成立に対する十分条件であり、必要十分条件であることを意味しているのではない。
- [2] ここでは、全ての経路に交通量が流れている、つまり、交通量が零の経路はないとする。
- [3] 情報の不完備性は、ゲーム理論における述語であり、行動主体が他の行動主体の知ることの出来ない私的情報を持ち、ゲームの構造に関する知識が行動主体間で同一でない場合のことを言う。通常、不完備情報ゲームにおいては、ベイジアン・ナッシュ均衡（Harsanyi, 1967-1968）が解として用いられる。しかし、小林（1990）は、交通システムのように行動主体が非常に多い場合、ベイジアン・ナッシュ均衡ように行動主体は他の全ての行動主体の行動を考慮すると想定するよりも、行動主体は学習を通じて各経路の旅行時間分布に関する合理的な期待を形成すると考える方が自然であるとし、合理的期待を用いて定式化を行っている。
- [4] 2.2.2 で述べた混合戦略ナッシュ均衡としての利用者均衡も行動の不確実性を考慮したものであるが、その違いは不完備情報下であるのか否かである。
- [5] 動的利用者最適では、行動主体は事後的にみるとより旅行時間の小さい経路を選択することができる場合があるため、経路変更の誘引が残るものであり、一般には均衡とは呼ぶことはできない。



## 参考文献

- 赤松 隆 (1996) 交通流の予測・誘導・制御と動的なネットワーク配分理論, 土木計画学研究・論文集, No. 13, pp. 23-48.
- 赤松隆・桑原雅夫 (1994) 渋滞ネットワークにおける動的利用者均衡配分, 土木学会論文集, No.488/IV-23, pp.21-30.
- Beckmann, M., C. G. McGuire and C. B. Winsten (1956) Studies in Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven.
- Charnes, A. and W.W. Cooper (1958) Extremal principles for simulating traffic flow in a network, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol.44, pp.201-204.
- Daganzo, C. F. and Y. Sheffi (1977) On Stochastic Model of Traffic Assignment, Transportation Science, vol.11, pp.253-274.
- Fisk, C. (1980) Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment, Transportation Research, vol. 14B, pp.243-255.
- 藤田素弘, 松井寛, 溝上章志 (1988) 時間帯別の交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究, 土木学会論文集, No.489/IV-8, pp.111-119.
- Harsanyi, J. C. (1967-1968) Games with Incomplete Information Played by Bayesian' Players, Management Science, No.I, II, III, Vol.14, pp.159-182; 320-334; 482-502.
- Jorgensen, N. O. (1963) Some Aspects of the Urban Traffic Assignment Problem, Master's Thesis Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, California.
- 小林潔司 (1990) 不完備情報下における交通均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.8, pp.81-88.
- 小林潔司, 井川修 (1993) 公共情報による経路誘導効果に関する研究, 土木学会論文集, No.470/IV-20, pp.185-194.
- 小林潔司, 文世一, 多々納裕一 (1995) 交通情報による経路誘導システムの経済便益評価に関する研究, 土木学会論文集, No.506/IV-26, pp.77-86.
- Lucas, R. E., Jr. (1978) Asset Prices in an Exchange Economy, Econometrica, Vol.46, No.6, pp.1429-1445.
- Maynard Smith, J. and G. R. Price (1973) The Logic of Animal Conflict, Nature, vol.246, pp.15-18.
- Merchant, D. K. and G. L. Nemhauser (1978) A Model and an Algorithm for the Dynamic Traffic

- Assignment Problems, Transportation Science, Vol.12, No.3, pp.183-199.
- Muth, J. F. (1961) Rational Expectations and the Theory of Price Movements, Econometrica, Vol.29, No.3, pp.315-335.
- Nash, J. (1951) Non-Cooperative Games, Annals of Mathematics, vol.54, pp.286-295.
- Sheffi, Y. (1985) Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Smith, M. J. (1993) A New Dynamic Traffic Model and the Existence and Calculation of Dynamic User Equilibrium on Congested Capacity-Constrained Road Networks, Transportation Research, Vol.27B, pp.49-63.
- Wardrop J. G. (1952) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, vol.1, pp.325-378.
- Wie, B. W., T. L. Friesz and R. L. Tobin (1990) Dynamic User Optimal Traffic Assignment on Congested Multidestination Networks, Transportation Research, Vol.24B, No.6, pp.431-442.

## 第3章 交通システムの動態と行動主体の学習過程

交通システムは動的かつ複雑なシステムである。交通システムにおける dynamics は、その発生要因や時間レベルによって次のように分類することができるであろう。まず第一に、走行する自動車同士の相互作用による dynamics である。この次元の dynamics は追従理論などによって記述される。次に、一日の交通需要が変化することによって生じる dynamics であり、前章で述べた動的配分はこの次元の dynamics を定式化しようとしたものである。第三に、日々走行する行動主体の学習による dynamics (day-to-day dynamics) である。Day-to-day dynamics では、交通状況を通じて行動主体同士が相互に作用を及ぼし合っている。第四には、土地利用の変化などの要因による長期的なものがある。

本研究の対象とする dynamics は、day-to-day 次元のものであり、次節以降、これまでに行われた交通システムにおける day-to-day dynamics に関する研究を以下に示す 1-5) の分類にしたがって整理する。

Mahmassani & Herman (1990) は、個人の意思決定を含む複雑な動的相互作用システムに関する研究アプローチを次のように分類している：1) 理想化された状況に対する解析モデル、2) ミクロな法則・規則や仮想的な因果関係を仮定したシミュレーション、3) 室内実験、4) 実地調査、5) 実地実験、である。各アプローチはそれぞれの利点・欠点を持つものであり、各アプローチにおける研究の観点・焦点も自ずと異なったものとなる。したがって、いずれのアプローチが優れているというより、それらは相補的關係にあると考えられる。

### 3.1 解析モデル

解析的モデルにおける研究の多くは、dynamics というより、システムの安定性という点に注目している。

Smith (1984) はリヤブノフの定理から、交通システムは利用者均衡に収斂することを証明した。ここでは、前提として、1) 走行時間関数が単調でかつ容量制限がない、2) 交通システムは旅行時間の小さい経路を選択する行動主体から構成されるため、経路間の旅行時間の差が小さくなるように交通量は移動する、が課せられている。しかし、多くの経路選択行動の結果、常に経路間の旅行時間の差が小さくなるように交通量が移動するとい

う前提条件 2) の現実性は疑問が残るものと言える。

Friesz et al. (1994) は、経済学における模索過程 (tätonnement モデル) (e.g. Hahn, 1982) を用いて交通システムの day-to-day dynamics を定式化した。旅行時間関数が連続で単調増加であるなどの条件が成立すれば、リヤプノフの定理からその安定性が証明されている。しかし、実際に模索過程に従って交通量が変化するという仮定が現実的であるのかという点は自明とは言えない。

Horowitz (1984) は行動主体の学習過程を考慮した上で確率的均衡の安定性について検討している。ここでは、行動主体が知覚する旅行時間 (以下、知覚旅行時間) が以下のような実際の旅行時間 (以下、実旅行時間) の重み付き平均によって形成されるとして学習過程が記述されている。

$$\hat{t}_{in} = \sum_{j=1}^{n-1} w_j \cdot t_{ij} + \varepsilon \quad (3.1)$$

ここで、 $\hat{t}_{in}$  :  $n$  日目の経路  $i$  の知覚旅行時間  
 $t_{ij}$  :  $j$  日目の経路  $i$  の実旅行時間  
 $w_j$  :  $j$  日目の重み  
 $\varepsilon$  : 確率項

行動主体が上記のような知覚旅行時間の最小となる経路を選択する場合の経路交通量は、必ずしもその極限值 ( $i \rightarrow \infty$ ) が収束する (システムが安定する) とは限らないことが証明された。最近の実旅行時間を重視し過ぎたり、また、過去の実旅行時間を重視し過ぎたりする場合、経路交通量は安定しない。

Cascetta (1989) と Cascetta & Canterella (1991) は、マルコフ過程により交通システムの day-to-day dynamics を記述しようとした。経路選択行動が過去  $m$  日前までのシステム状態に依存すると仮定すれば、システム状態の変化は  $m$  次のマルコフ過程によって記述することが可能であり、その結果、システム状態はエルゴード的な (唯一の確率分布に収束する) 安定性が保証される<sup>[1]</sup>。

前章でも述べたが、小林 (1990) は合理的期待仮説に基づいたネットワーク均衡を提案している。小林・藤高 (1993) は、行動主体がベイズ学習を行うと仮定すると、交通システムは合理的期待均衡に収束することを示した。

### 3.2 シミュレーション

モデルを解析的に解くためには、仮定に関する制限が大きくなるため、より現実的な仮定の下でモデル化する場合はシミュレーションが用いられる (シミュレーションに関しては、第 5 章で詳述する)。

Horowitz (1984) は、前節で述べたモデルと異なるモデルも提案している。前節で述べたモデルでは、式 (1) から分かるように行動主体は自分が走行していなかった経路の旅行時間も知ることができると仮定されていた。しかし、実際には自分が走行しなかった経路の旅行時間を知ることが出来ない場合がほとんどである。したがって、Horowitz (1984) は以下に示すような自分が走行し経路の旅行時間 (経験旅行時間) のみの重み付き平均として知覚旅行時間を定式化している。

$$\hat{t}_{in} = \begin{cases} \hat{t}_{i0} & \text{if } \sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij} = 0 \text{ or } j = 1 \\ \sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij} \cdot w_j \cdot (t_{ij} + \varepsilon) / \sum_{j=1}^{n-1} \delta_{ij} \cdot w_j, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、 $\hat{t}_{in}$  : 経路  $i$  の  $n$  日目の知覚旅行時間  
 $\hat{t}_{i0}$  :  $\hat{t}_{in}$  の初期値  
 $t_{ij}$  :  $j$  日目の経路  $i$  の実旅行時間  
 $w_j$  :  $j$  日目の重み  
 $\varepsilon$  : 確率項

ただし、 $\delta_{ij}$  は、行動主体が経路  $i$  を  $j$  日目に走行した場合は 1 をとり、走行しなかった場合は 0 をとる。このように定式化した場合、これを解析的に取り扱うことはもはやできないため、シミュレーションが用いられる。いくつかの数値実験によって、交通量は初期値によって収束値が異なることが示された。また、飯田等 (1989) も知覚旅行時間の定式化は Horowitz (1984) のものと異なるものの、同様のシミュレーションによって同様の結果を得ている。

Mahmassani & Chang (1986) は、学習過程を考慮した出発時刻選択モデルを構築し、交通システムの day-to-day dynamics を考察した。彼らのモデルの特徴としては、Simon (1957) の satisficing の考え方を導入していることである。数値実験の結果、システムは収束するとは限らず、また、収束したとしても、収束状態は初期値に依存して異なることという結果を得ている。

以上の結果は必ずしも交通量が利用者均衡に収束するとは限らず、初期値によって収束



状態が異なることを示したものが多い。このような現在の状態が過去の状態に依存するという性質は経路依存性（path dependence）と呼ばれる（e.g. Arthur, 1988）。交通システムが経路依存性である場合、システムの現在の状態は過去の状態に依存するため、単に最適化問題を解くことによって得られる均衡状態としてシステムを記述することができるというように時間の概念を全く捨象することはできず、システムの状態変化のプロセスを（時間を追って）記述する必要が生じる。

### 3.3 室内実験

#### 3.3.1 室内実験の特徴

室内実験とは、被験者が室内という仮想的な状況下で経路選択や出発時刻選択を行うことによって、交通行動や交通システムの挙動を観察するものである。室内実験では、SP 調査（Stated Preference 調査）と同様に、調査内容を設計でき、被験者の選択肢集合を明確にした上で、採取したい内容を質問することができる。また、実験環境やネットワークに関する知識等を統制することができるため、交通システムや交通行動における因果関係と特定しやすい。問題点としては、得られたデータの信頼性、すなわち、仮想状況下における意志決定と現実行動との一致性、および実験条件または質問方法による選好のばらつき、という SP 調査と同様の問題（e.g. 森川, 1990）を抱えることになる。

室内実験によって採取したデータは、通常、ランダム効用理論を中心とした離散選択モデル等によって分析される。ここで注意すべきこととしては、人間の意思決定においては、効用理論では説明することの出来ない現象があるということである。人間は意思決定問題に直面した場合、その問題を心理的にどのように解釈するのか、ということが意思決定に大きな影響を及ぼす。同じ問題で、各選択肢の客観的な特徴が全く同じであっても、その問題の記述方法によってその結果が異なることがある。これはフレーミング効果（framing effect）と呼ばれる（Tversky & Kahneman, 1981）。例えば、一対比較による選択問題とマッチング問題とでは選好関係が保存されないという現象がみられる（Tversky et al., 1988）。また、不確実性下での人間の意思決定の結果は期待効用理論によるものと系統的に異なる場合があることが知られている（Tversky & Kahneman, 1979）。このように人間の合理性を前提とした効用理論では捉えられない同様の現象は多数報告されており、効用理論が前提とするように人間の意思決定、そして選好というものは必ずしも無矛盾であるようには見受けられないことが示されている。これは、先ほど示した SP 調査および室内実験の結

果を単純には議論することができないことを意味していると考えられる。室内実験の間で異なる分析結果が出来ることは十分にあり得ることであり、効用理論を中心に分析を行っている限り、いずれの結果がより現実を反映しているのかという問題を十分に検討することは困難であると考えられる。人間の意思決定はフレームによって異なり、時と場合によって変幻自在に変化するため、そもそも、その室内実験がどれほど現実を反映しているのかという現実からの「距離」自体が存在しないものであるかもしれない。

#### 3.3.2 既往の室内実験

Mahmassani は、交通システムは時間の経過とともに収束するものなのか、もし収束するとするならばその状態と均衡とは一致するものなのか、また、その動的な過程（dynamics）はどのようなものか、を検討するために室内実験を行っている（e.g. Mahmassani, 1990）。Mahmassani らが行った室内実験では、被験者に対して主に出発時刻を尋ね、その選択結果を集計し、シミュレーション・モデルにより旅行時間を算出する。そして、被験者に旅行時間結果を知らせ、再び出発時刻を尋ねる。これらの繰り返しが室内実験の内容である。Mahmassani らの室内実験において特徴的であるのは、人間はその合理性が制限されたものであるため、最適化というより満足化（satisficing）を追求するものであるとの考え方（Simon, 1957）を導入していることである。

Mahmassani らは三つの室内実験を行っている。実験 1（Mahmassani & Chang, 1985; Mahmassani et al., 1986）と実験 2（Mahmassani & Tong, 1986）では、被験者は出発時刻選択のみを行い、実験 3（Mahmassani & Stephan, 1988）では出発時刻選択と経路選択の両方を行う。実験 1 と実験 2 の違いは、被験者に知らせる情報量であり、実験 1 の被験者には前日に自分がとった行動の結果のみを知らせるのに対して、実験 2 では前日の全ての出発時刻に対する結果を知らせるものである。また、実験 3 では、自分のとった行動のみの結果を知らせた被験者と前日の全ての結果を知らせた被験者の両方が同数存在する。実験の結果は、実験 1 および 2 での交通量は収束したが、実験 3 での交通量は収束しなかった。実験 3 において収束しなかった原因としては、選択における次元が増加したこと、混雑レベルが実験 1 および 2 よりも大きいことなどが挙げられているが、十分には検討されていない<sup>[2]</sup>。また、収束状態に関しては、実験 1 と実験 2 のそれは同一ではないという結果が得られている。これは、辿ってきた path の違いが影響したものと考えられ、システムは経路依存性（path dependence）（e.g. Arthur, 1988）を持つことが分かる。Mahmassani らの室内実験結果は、前章で述べたような均衡の概念によって交通システムを記述することが必ずしも適切ではないことを示唆しているものと考えられる。

飯田等は経路選択行動を対象とした室内実験を行っている（飯田等，1993；Iida et al., 1992）．飯田等の室内実験では，被験者に旅行時間の予測を行わせた上で，経路を選択させており，旅行時間の予測メカニズムの解明に焦点が当てられている．実験結果としては，1) 実験期間内では交通量は収束することではなく，収束する兆しも見られない，2) 旅行時間予測モデルとしては，単に過去に経験した旅行時間の重み付きによるモデルよりも，予測値と実際の旅行時間の差（予測誤差）に基づいたモデルの方が優れている，などが示されている．

小林・安野（1995）は，合理的期待仮説に基づいた交通ネットワーク均衡モデル（小林，1990）に基づき，室内実験によって合理的期待仮説の成立に関して検討を行っている．統計的な検定の結果，有意水準 1%において，合理的期待仮説は棄却されなかったとしている．

その他の室内実験としては，Adler & McNally (1995) や Bonsall (1992) がある．これらの研究では，PC（Personal Computer）を用いたシュミレータによって，情報提供した場合の経路選択行動の分析を行うものである．

以上で見た室内実験の結果からは，交通量は収束するのか，収束するための要因は何か，という問題に関して確かな結論を下すことはできないが，必ずしも均衡が成立するとは断定できないと言えるのではないかと考えられる．

### 3.4 実地調査および実地実験

実際の交通量や交通行動を観測することによって，day-to-day dynamics を分析することは容易なことではない．ある特定のネットワークに着目して交通量を日々観測しただけでは，そのネットワークに流入する交通量の変化などの環境変化のため，交通量は収束するのか，もし収束するとすればそれは均衡と一致するのか，などの問題を考察することは極めて困難である．また，実地実験（社会実験）の実施は，実験に協力してもらう人間の数が莫大なものであり，社会的合意を得ることが難しい．さらに，実験期間が何日，何十日となるため，実験費用が膨大になる．単に実地調査や実地実験を実施するというより，むしろ，交通環境の変化にあわせて交通量や交通行動を観測することの方が，効果的に分析が行える場合があると考えられる．例えば，村野等（1996）は阪神・淡路大震災における交通規制時における交通流を観測し，また，藤井等（1999）は阪神高速道路堺線の通行止め期間における交通行動を調査している．

注

- [1] ここで，Horowitz (1984) の安定性の概念と Cascetta (1989)の安定性の概念は異なることに注意する必要がある．（無限の）時間の経過によって，前者がある「値」に収束する場合を安定としているのに対して，後者はある「分布」に収束する場合を安定としている．
- [2] 実験 1 および実験 2 では 1 経路のみであったのが，実験 3 では 2 経路となり，被験者は経路選択も行う．実験 3 では，一方の経路は実験 1 および 2 と同じ属性であり，もう一方の経路はそれよりも交通容量が小さいものである．実験 3 の被験者の数は経路実験 1 および実験 2 の二倍であり，したがって，実験 3 の混雑状況は経路実験 1 および 2 よりも大きなものとなっている．

## 参考文献

- Adler, J. L. and M. G. McNally (1992) In-Laboratory Experiments to Investigate Driver Behavior under Advanced Traveler Information Systems, *Transportation Research*, vol.2C, pp.149-164.
- Arthur, B.W. (1988) Self-Reinforcing Mechanisms in Economics, *The Economy as an Evolving Complex System* edited by Anderson, P.W. et al., Addison Wesley, Reading, Massachusetts, pp.9-31.
- Bonsall, P. (1992) The Influence of Route Guidance Advice on Route Choice in Urban Networks, *Transportation*, vol.19, pp.1-23.
- Cascetta, E. (1989) A Stochastic Process Approach to the Analysis of Temporal Dynamics in Transportation Networks, *Transportation Research*, Vol.23B, pp1-17, 1989
- Cascetta, E. and G. E. Canterella (1991) A Day to Day and Within-Day Dynamic Stochastic Assignment Model, *Transportation Research*, Vol.25A, pp277-291.
- Friesz, T. L., D. Bernstein, N. J. Mehta, R. L. Tobin, S. Ganjalizadeh (1994) Day-to-day Dynamic Network Disequilibria and Idealized Traveler Information Systems, *Operations Research*, Vol.42, pp.1120-1136.
- 藤井聡, 中野雅也, 北村隆一, 杉山守久: 自動車通勤ドライバーの公共交通機関の思い込み認知とその改善についての実証的研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 4 部, pp.636-637, 1997.
- Hahn, F. (1982) Stability, *Handbook of Mathematical Economics*, vol.II, K. J. Arrow & M. D. Intriligator (eds.), North-Holland, Amsterdam, pp.745-793.
- Horowitz, J.L. (1984) The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-Link Transportation Network, *Transportation Research*, vol.18B, pp.13-28.
- Iida, Y., T. Akiyama and T. Uchida (1992) Experimental Analysis of Dynamic Route Choice Behavior, *Transportation Research*, Vol. 26B, pp.17-32.
- 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏: 交通情報を考慮した経路選択行動の動的分析, 土木学会論文集, No.470/IV-20, pp.77-86, 1993.
- 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏 (1989) 経路選択行動の動態変化に関するシミュレーション分析, 土木計画学・講演集, No.12, pp.29-36.
- 小林潔司 (1990) 不完備情報下における交通均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.8, pp.81-88.
- 小林潔司, 藤岡勝巳 (1993) 合理的期待形成過程を考慮した経路選択モデルに関する研究,

- 土木学会論文集, No.458/IV-18, pp17-26.
- 小林潔司, 安野貴人 (1995) 室内実験によるドライバーの合理的期待に関する仮説検定, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.493-500.
- Mahmassani, H. S. (1990) Dynamic Models of Commuter Behavior: Experimental Investigation and Application to the Analysis of Planned Traffic Disruptions, *Transportation Research*, vol.24A, pp.465-484.
- Mahmassani, H. S. and G.-L. Chang (1985) Dynamic Aspects of Departure-Time Choice Behavior in a Commuting System: Theoretical Framework and Experimental Analysis, *Transportation Research Record*, No.1037, pp.88-101.
- Mahmassani, H. S. and G.-L. Chang (1986) Experiments with Departure Time Choice Dynamics of Urban Commuters, *Transportation Research*, vol.20B, pp.297-320.
- Mahmassani, H. S., G.-L. Chang and R. Herman (1986) Individual Decisions and Collective Effects in a Simulated Traffic System, *Transportation Science*, vol.20(4), pp.258-271.
- Mahmassani, H. S. & R. Herman (1990) Interactive Experiments for the Study of Tripmaker Behaviour Dynamics in Congested Commuting Systems, *Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis* edited by P. Jones, Avebury, Aldershot, England.
- Mahmassani, H.S. and D.G. Stephan (1988) Experimental Investigation of Route and Departure Time Choice Dynamics of Urban Commuters, *Transportation Research Record*, No. 1203, pp. 69-84.
- Mahmassani, H. S. and C.-C. Tong (1986) Availability of Information and Dynamics of Departure Time Choice: Experimental Investigation, *Transportation Research Record*, No.1085, pp.33-47.
- 森川高行 (1990) ステイティッド・プレファレンス・データの交通需要予測モデルへの適用に関する整理と展望, 土木学会論文集, No.413/IV-12, pp.9-18.
- 村野隆彦, 松本圭司, 内田敬 (1996) 阪神・淡路大震災時の交通規制下における乗用車交通流, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 4 部, pp.58-59.
- Simon, H. A. (1957) *Models of Man: Social and Rational*, John Wiley & Sons, New York. (宮沢光一監訳 (1970) 人間行動のモデル, 同文社, 東京.)
- Smith, M. J. (1984) The Stability of Dynamic Model of Traffic Assignment: An Application of Method of Lyapunov, *Transportation Science*, Vol.18, No.3, pp245-252.
- Tversky, A. and D. Kahneman (1979) Prospect Theory- An Analysis of Decision under Risk, *Econometrica*, vol.47, pp.263-291.



Tversky, A. and D. Kahneman (1981) The Framing of Decisions and the Psychology of Choice, Science, 211, pp.453-458.

Tversky, A., S. Sattath and P. Slovic (1988) Contingent Weighting in Judgement and Choice, Psychological Review, vol.95, pp.371-384.

## 第4章 認知過程と限定合理性

### 4.1 限定合理性

前章で述べたように（交通ネットワークの）均衡分析では、行動主体に対して効用最大化もしくは完全合理性が仮定される。しかし、Simon (1947) が指摘したように、人間の合理性は完全なものではなく、限定的なものである。すなわち、人間は環境に関して不完全な知識しか持っておらず、また、その情報処理能力は限られており、可能な行動の全てを検討することはできないため、人間の合理性は限定的なもの、すなわち限定合理性となる。本節では、以下に、限定合理性に関して述べるとともに、限定合理的な行動主体の行動の記述における認知過程の考慮の必要性について説明する。

#### 4.1.1 限定合理性と手続的合理性

ある状況において採用される行動が目標に対して適切であることを「目的合理性」という。このように規定される「目的合理性」の概念は、「実体的合理性」(substantive rationality) と「手続的合理性」(procedural rationality) に分けて考えることができる。

外的環境の諸条件が行動主体に課してくる制約を与件として、主体が目標を達成する上でもっとも合理的な選択を行う場合、この主体の行動は実体合理的であると定義される。このような実体的合理性の下では、行動の合理性は目標というただ一つの観点から判断される。これと対照的に、行動が適切な考慮の結果である場合、すなわち行動が生み出されるプロセスの観点から見て合理的である場合、それは手続合理的であると規定される (Simon, 1976)。行動主体が手続的に合理的である場合、行動と目標の客観的な関係からはその合理性は限定的なものとなる。つまり、手続的合理性と限定合理性は同一のものを異なった視点から見たものであり、人間の合理性を積極的に捉えれば手続きの合理性となり、消極的に捉えれば限定合理性となると考えられる。

#### 4.1.2 認知過程の考慮の必要性

##### (1) 行動のプロセス記述

行動主体の完全合理性を仮定した場合、効用理論によって、主体の行動を効用が最大化

された「状態」として記述することができる。この時、外的環境の諸条件さえ与えれば、行動を記述することができる。行動を記述するために必要な情報は外的な環境に関するものだけであるとともに、行動主体がどのようなプロセスを経て行動を決定したのかという点に関しては全く取り扱う必要がない。しかし、（実際の人間がそうであるように）行動主体に対して限定合理性を仮定する場合、行動を単に効用が最大化された「状態」として記述することはできない。限定合理性は行動が決定される「プロセス」を考慮した合理性であり、行動記述にも「プロセス」の観点が必要である。

Simon (1959) は、行動の記述には「プロセス」の観点が必要であることを以下のような例えを用いて説明している。

もしシロップを注ぎ込むボールが激しく揺れ動くとするれば、もしくは均衡に到達するまでの動きについて何か知ろうとするれば、非常に多くの情報が必要となる。とりわけ、シロップの特性について多くの情報が求められよう。中でも、シロップの粘性についての知識—それが入っている容器に「適応」していく速度、重心を低くするという「目標」を達成する速さに関する情報などがどうしても必要となってこよう。つまり、適応的有機体の短期の行動、もしくは複雑で急速に変化しつつある環境下にある有機体の行動を予測するには、その目標を知るだけでは不十分である。内的構造と特にその適応メカニズムについて多くを理解しなければならない。

つまり、行動主体が常に変化する環境下にある場合などでは、行動を記述するためには、環境の変化のみならず、行動主体の内的な構造、すなわち、認知過程を考慮する必要がある。

(2) 認知と主観的世界

ランダム効用理論を用いた交通行動分析においては、効用関数が推定されれば、説明変数に客観的な値を代入することによって、行動の予測を行う。これは、客観的世界と主観的世界を区別せず、行動は現実あるがままに認知した結果であることを前提としている。しかし、人間が処理できる情報は限られたものであるため、入手できる情報の一部もしくは大部分を削除されるため、環境を現実と異なったものとして認知していると考えられる。つまり、限定合理性下では、行動主体の認知する世界（主観的世界）と現実世界とは区別する必要がある。したがって、行動主体の認知過程を明示的に考慮する必要がある（Simon, 1963）。予測する場合やマクロ的な状態を記述する場合にでも、客観的世界と主観的世界が一致しないとすると、客観的な値を元にして行動を予測・記述すると、その結果は系統的な誤差を生む危険性を孕むことになる。

4.2 記憶から見た認知過程

前節では、人間は認知的制約のため、限定合理的であり、そのような人間の行動を記述するためには、認知過程を考慮することが必要であると述べた。本節では、人間の認知的制約とはどれ程のものか、そして、人間の行動を決定するプロセス、すなわち、認知過程はどのようなメカニズムとなっているのか、といった問題を認知心理学の研究に基づいて説明する。

認知心理学では、人間の思考を情報処理とみなすという考え方（情報処理アプローチ）が主流である。以下では、そのような情報処理という観点から人間の記憶に関して説明する中で、人間の認知過程を明らかにする。

4.2.1 記憶モデルの概要

記憶システムを情報処理の観点から理論化したものが、以下で説明する二重貯蔵モデルである。

Atkinson & Shiffrin (1968) によると、記憶システムは構造的に独立な短期記憶と長期記憶からなる次のようなシステムとされる。外界からの情報は、まず感覚登録器に入り、選択的注意によって選び出されたものだけが、短期貯蔵庫に送られ、そこで一定期間保持される。しかし、短期貯蔵庫の容量は限られており、新しい情報が次々入ってくると、古い

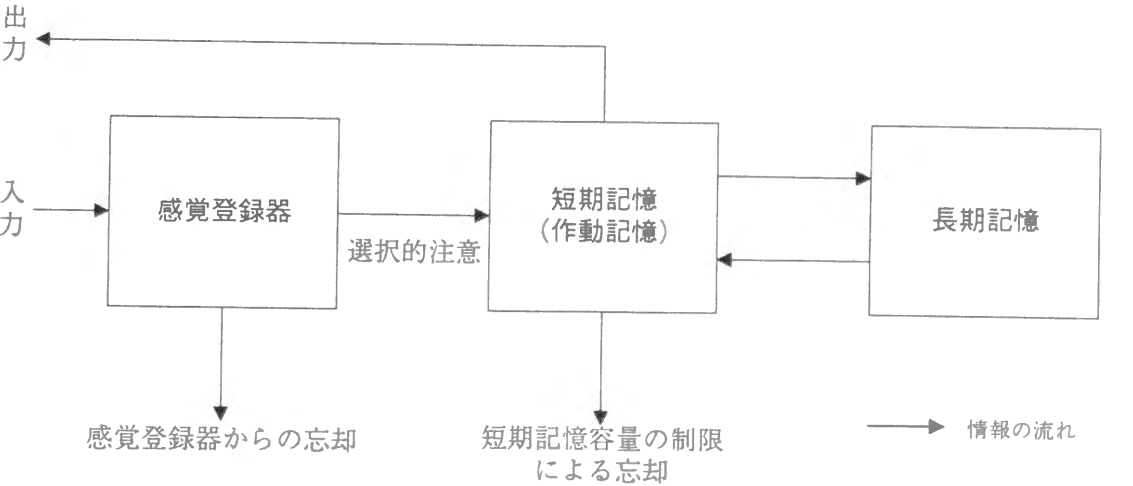


図 4.1 記憶システム



情報は押し出され、忘れ去られてしまう。忘却を防ぐためには、情報をリフレッシュさせるリハーサルと呼ばれる活動が必要になる。短期貯蔵庫には、このため、一定数のスロットをもつリハーサルバッファが想定されていて、スロットの数以下の量の情報を繰り返し循環させることで、情報の保持が可能になるという。この情報の保持の機能に加えて、リハーサルには、情報を次の貯蔵構造である長期貯蔵庫に転送する機能もあるとされる。短期貯蔵庫内に滞在する時間が長いほど、その情報が長期貯蔵庫に転送される確率が高いと考えられている。したがって、リハーサルの回数が多いほど、その情報が長期記憶として定着する可能性も高いことになる。そして、一旦長期貯蔵庫に保存された記憶は半永久的に保持されると考えられている。

#### 4.2.2 短期記憶と作動記憶

限られた量の情報を短期間保存しておくための記憶システムの存在はかなり以前から指摘されていた (James, 1890)。Miller (1956) によると、人間が一度に保持できる情報の量はおおよそ  $7 \pm 2$  チャンクに限られる。チャンクとは、何らかのまとまりをもつ情報の塊のことである。また、保持時間もリハーサル等を行わなければ、約 10 秒ほどで消失してしまう (Murdock, 1961)。

短期記憶を長期記憶と切り離さず、記憶が一時活性化されている部分が短期記憶だとみなす考え方 (Anderson, 1980) や、記憶を情報の処理の深さの観点からみる考え方 ( Craik & Lockhart, 1972) の研究が進められている。しかし、いずれの考え方であったとしても、人間が一度に保持できるチャンクの数に限られており、人間の認知過程における厳しい制約となっていることは共通している。

近年では、短期記憶よりも作動記憶（または作業記憶）という概念が用いられることが多い。短期記憶が記憶の短期的な保持機能を中心に捉えていたのに対して、作動記憶はそれに加えて処理機能も考慮したものである。

#### 4.2.3 長期記憶と知識構造

長期記憶は単に個々の事象がそのままの形で貯蔵されているだけではない。概念に基づいて、対象をカテゴリー化して記憶することができるし、単にカテゴリー化されたものを記憶するだけでなく、意味を付加して記憶している。また、もっと広範かつ一般的に構造化された「知識」として貯蔵されている。

#### (1) 知識の表象

Bartlett (1932) は、被験者に幽霊の戦いと呼ばれる物語を記憶させ、後に再生させる実験を行ったところ、そこでは系統的な歪みが起きていることが見受けられたことから、人間の理解には既に獲得した知識や概念が必要であるとし、知識の重要性を指摘した。

知識は、入手した情報をそのまま記憶したものというよりも、何らかの程度において整理され、一般化・抽象化されたものと考えられる。このような知識をもつことによって、人間は直面する状況や事象・現象を「理解」することができ、また、新たな状況に対して、適切な予測をもち、適切な行動をとることができるように学習することができるといえる。

このような知識がどのような構造を持っているかに関しては次のような概念が提案されている。Rumelhart & Ortony (1977) は、主に概念といったものを表現するための知識構造としてスキーマ (図式) を提案した。また、Schank & Abelson (1977) は日常生活における定型的な活動や事象の流れに関する知識をスクリプトと呼んだ。人工知能の分野において、計算機において知識を表現するためのデータ構造はフレームと呼ばれる (Minsky, 1975)。また、プロダクションシステムにおける if-then ルール (プロダクション) は手続きに関する知識を表現したものである。

#### (2) 長期記憶の忘却

短期記憶は極めて短い時間でしか保持されない記憶である。一方、長期記憶は半永久的に保持されると考えられることが多い。議論の余地が残されているものの、その根拠としては、手術中の患者の脳の側頭葉に電気刺激を与えらところ、患者が忘れていた幼少時代の記憶を思い出したことがあげられる (Penfield & Roberts, 1959)。人間の忘却は、保持された情報は時間と共に消え去るというよりも、それを再生することができなくなるとみなされている。

#### 4.2.4 記憶と限定合理性

以上において、情報処理アプローチに基づいた記憶システムについて述べてきた。このような認知心理学における知見は、行動を限定合理的なものとする人間の認知的制約がどのようなものかを示している。人間の認知的制約とは、第一に、意思決定のための際の情報処理で用いられる短期記憶の容量がごく僅かな量に限定されていることである。次に、長期記憶は無限に近い記憶容量があるものの、長期記憶として貯蔵するためには、短期記憶の段階でリハーサル等が必要であるなどの労力や時間が必要であり、知覚された情報のすべてが貯蔵されるわけではないことである。また、長期記憶として貯蔵することができ

たとしても、それを再生できないことも多く、見かけ上には忘却されてしまう。さらに、情報は一般化・抽象化され、知識となるが、知識は既にある知識に基づくものであり、決して完全なものとなることはない。このような記憶システムにおける構造特性が認知的制約となり、人間の合理性は先の述べたように限定されたものとなる。以上のような認知心理学における知見は限定合理性の概念に対して実証的な根拠を与えるものであると言える。

#### 4.3 プロダクション・システム

前節では、記憶に関して述べてきた。それは、人間の認知過程を情報処理とみなして、ストックの面から明らかにしたものである。単に概念やアナロジーとしてだけ認知過程を情報処理とみなすのではなく、実際の計算機上での情報処理を人間の認知過程モデル（CPM: Computer Processing Model）とするアプローチもある。情報処理アプローチの原型はむしろ CPM であり、その先駆けは数学定理を証明するコンピュータ・シミュレーションのロジック・セオリストである（Newell & Simon, 1956）<sup>[11]</sup>。ロジック・セオリストを発展させ、ヒューリスティックス（heuristics）を用いて様々な問題解決を行うようになったものが一般問題解決器（GPS: General Problem Solver）である（Ernst & Newell, 1969）。ここで、ヒューリスティックスとは、必ずしも問題を解決し、正解を出すとは限らないが、効率的な方略のことである（Anderson, 1980）。

プロダクション・システムは Newell & Simon (1972) が提案した人間の問題解決モデルである。このプロダクション・システムは以下で説明するように人間の記憶システムの考え方をコンピュータ化したものである。また、それは実用的にも用いられており、エキスパート・システムと呼ばれるもののほとんどはこのプロダクション・システムである。

プロダクション・システムは if-then ルール（プロダクション）に基づいて問題解決を図るシミュレーション・システムである。if-then ルールは「…ならば～せよ」というルールであり、「…ならば」を意味する条件部と「～せよ」を意味する実行部から構成される。プロダクション・システムでは、まず、与えられた問題は符号化され、内部状態を表わす変数に初期値が設定される。その変数値と条件部が合致する if-then ルールがあれば、変数値はそのルールの実行部に書き換えられる。このような処理を変数が解に到達するまで繰り返すことにより、プロダクション・システムは問題を解決する。

プロダクション・システムは人工知能の分野において主に研究されてきたが、Anderson (1993) は手続き的知識をプロダクションとして表現した ACT-R (Anderson, 1993) や ACT\* (Anderson, 1996) と呼ばれる認知過程モデルを構築した。ここで、手続き的知識と

は物事を行う方法に関する知識のことである。Anderson は、記憶の二重記憶仮説に則り、長期記憶であるプロダクションのうち活性した状態（すぐに呼び出し可能な状態）のものを短期記憶と考え、プロダクション・システムに心理学的な基礎を与えた（Anderson, 1980）。

#### 4.4 帰納と学習

推論は演繹的推論と帰納的推論に分けることができる。帰納的推論では、いわゆる学習というものが一体どのようなメカニズムであるのかを明らかにする。

##### 4.4.1 演繹的推論

演繹的推論とは、普遍的な規則から論理的に推論することであり、形式的に規則を当てはめることのみで、推論の方法以外の知識を一切必要としない推論である。しかし、人間は演繹的な問題に対して、形式的なルールを単に適用するだけという演繹的な推論を行ってはいないことが明らかになっている（Evans, 1982）。Johnson-Laird (1983) は、人間は純粹に演繹的な推論を行うのではなく、仮説またはとりあえずの結論を構成し検証するという過程によって推論を行うというメンタルモデル理論を提唱した。また、Cheng & Holyoak (1985) は、形式的な規則（一般的規則）でもなく、その問題にしか当てはまらないような知識（領域固有の知識）でもなく、その中間的な知識である実用論的スキーマを用いて推論を行っていることを示した。

##### 4.4.2 帰納的推論と学習

帰納的推論は、事例の観察に基づいて、一般化を行い、それを新しい状況に適用することと考えられる<sup>[12]</sup>。

図 4.2 は、4.2 で述べた記憶の面から帰納的推論を示したものである。 $i$  期において、図 4.2 の上半分に示されたような記憶システムを持った主体が行動  $a$  をとり、その結果情報を元に  $(i + 1)$  期に帰納が行われるとする。 $i$  期においては、必要な外部情報を知覚するとともに、必要な長期記憶が長期記憶貯蔵庫から引き出される。ここで、引き出されるということは、演算・処理が施されることの出来る状態、すなわち、作動記憶（短期記憶）になるということであり、活性化された状態（Anderson, 1980）となることである。また、この場合の長期記憶は、大抵、今までに獲得された個々の情報が一般化・抽象化された「知

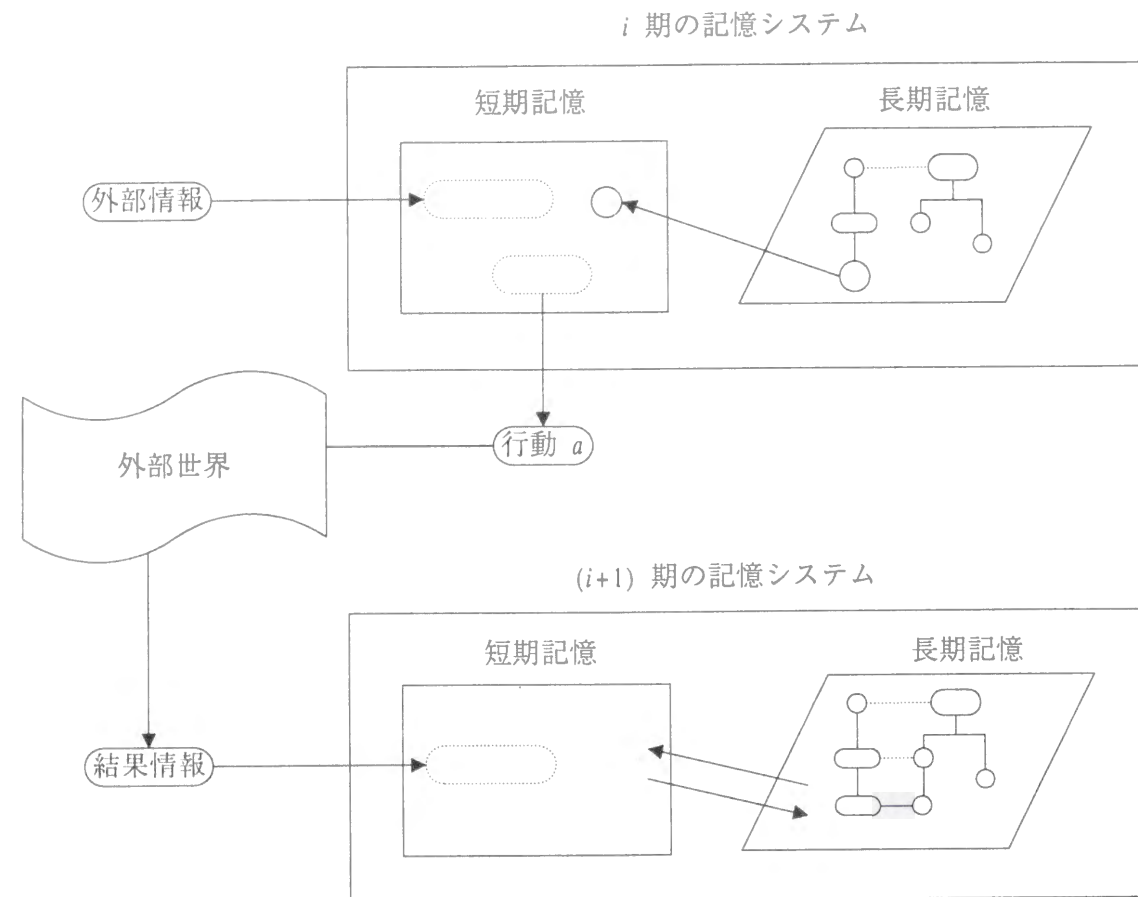


図 4.2 記憶システムから見た帰納的推論

識」である。知覚された外部情報にその知識が適用され、その主体がとる行動  $a$  が決定される。前節におけるプロダクション・システムでは、その知識は if-then ルールによって表されとしたものであり、基本的な考え方は上で述べたものと同じである。

このようにして決定された行動  $a$  に対する結果情報が得られれば、行動主体は知識の拡張とも言えるべき帰納を行う。帰納のプロセスは、端的に言うと、結果情報を元に、長期記憶を変化させることである。この場合の長期記憶は情報が一般化・組織化された「知識」であるため、その内容が増加されたり、整理・構造化される。このような知識の修正・改正がいわゆる学習である。以上の過程が帰納的推論である。学習過程が具体的にどのようなものかは、知識がどのように表象されるのかにも関わるものであり、必ずしも統一されてはいない<sup>13)</sup>。しかし、ほとんどが研究は帰納を知識の変化と捉えるという基本的考え方は同じである。

前節で見たように人間が実際に行っている推論のほとんどは形式的な論理のみによるものではない。Holland et al. (1986) は、人間の思考にとって本質的な役割を持つものが帰納

であると考え、それを定式化している。ここでは、帰納を不確実な状況において、知識を拡張する推論過程のすべてを含むものとしている。これは、学習の本質は帰納であることを意味すると考えられ、彼らの試みは、動物学習や日常学習などの学習に加え、問題解決・科学的発見・類推などを統一的に取り扱える理論のフレームワークを構築しようとするものである。

Holland et al. (1986) は、このような帰納（学習）を計算論的に取り扱う枠組みを提案している。これは、4.3 で述べたプロダクション・システムと同じく、if-then ルールに基づくシステムである。つまり、知識はルールによって表象されるとしている。これらのルールが遺伝的アルゴリズム (Goldberg, 1989; Holland, 1975) を用いて更新されることによって、帰納でいうところの仮説の形成、一般的な言葉で言うと学習が再現される<sup>14)</sup>。



- [1] 既に述べた Simon は限定合理性の概念を発表し、人間の認知過程に目を向ける必要性を感じ、Newell の研究グループに加わった。一方、Newell の方も、パズル解きなどの課題をコンピュータで行う場合、総当たりでは記憶容量や計算時間が現実とかけ離れたものになるため、Simon の限定合理性の概念が必要と考えていた。
- [2] 例えば、人は、このレストランのフライはまずかった。そして、サラダもまずかった、とすると、このレストランの料理はまずい、と一般化して、結論付けるであろう。実際の人間の推論はこのような帰納的推論を行うことがほとんどであると考えられる。この推論には論理的には飛躍がある。そのレストランのスパゲティはおいしいかもしれない。しかし、このような論理的な飛躍によって知識が増えたとみることができる。
- [3] 例えば、Rumelhart & Norman (1978) は、知識はスキーマによって表象されとし、学習過程をスキーマの「付加」「調整」「再構成化」という過程であると主張している。また、Holland et al. (1986) は、知識は if-then ルールによって表象されとし、以下で述べるようにその変化過程、すなわち、学習過程を遺伝的アルゴリズムによってモデル化している。
- [4] ルールが遺伝的アルゴリズムによって更新されるシステムは分類子システム (classifier system) と呼ばれることもある (Goldberg, 1989)。分類子システムには、CS-1 (Holland & Reitman, 1978) と LS-1 (Smith, 1984) の 2 種類が提案されている。Holland et al. (1986) で用いられているのは CS-1 の方である。

- Anderson, J. R. (1993) Rules of the Mind, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.
- Anderson, J. R. (1996) The Architecture of Cognition, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, New Jersey.
- Anderson, J. R. (1980) Cognitive Psychology and Its Implications, W. F. Freeman and Company, San Francisco. (富田達彦, 増井透, 川崎恵里子, 岸学訳 (1982) 認知心理学概論, 誠信書房, 東京.)
- Atkinson, R. C. and R. M. Shiffrin (1968) Human Memory- A Proposal System and Its Control Process, The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory, vol.2, Spence K. W. and J. T. Spence eds., Academic Press, New York, pp.89-195.
- Bartlett, F. C. (1932) Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology, Cambridge University Press, London. (宇津木保, 辻正三訳 (1983) 想起の心理学: 実験的社会的心理学における一研究, 誠信書房, 東京.)
- Cheng, P. W. and K. J. Holyoak (1985) Pragmatic Reasoning Schemas, Cognitive Psychology 17, pp.391-416.
- Craik, F. I. M. and R. S. Lockhart (1972) Level of Processing: A Framework for Memory Research, Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, Vol.11, pp.671-684.
- Ernst, G. and A. Newell (1969) GPS: A Case Study in Generality and Problem Solving, Academic Press, New York.
- Goldberg, D. G. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Holland, J. H. (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Holland, J. H, K. J. Holyoak, R. E. Nisbett and P. R. Thagard (1986) Induction: Processes of Inference, Learning, and Discovery, MIT Press, Cambridge. (市川伸一他訳 (1991) インダクションー推論・学習・発見の統合理論へ向けて, 新曜社, 東京.)
- Holland, J. H and J. S. Reitman (1978) Cognitive Systems Based on Adaptive Algorithms, Pattern Directed Inference Systems, D. A. Waterman and F. Hayes-Roth eds., Academic Press, New York, pp.313-329.
- James, W. (1890) The Principles of Psychology, Henry Holt and Company, New York.
- Johnson-Laird, P. N. (1983) Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference and Consciousness, Cambridge University Press, Cambridge. (海保博之監訳 (1988) メン

タルモデル：言語・推論・意識の認知科学，産業出版，東京。）

Miller, G. A. (1956) The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information, *Psychological Review*, vol.63, pp.81-97.

Minsky, M. (1975) A Framework for Representing Knowledge, *The Psychology of Computer Vision*, P. H. Winston ed., McGraw-Hill, New York, pp.211-277. (白井良明, 杉原厚吉訳 (1979) コンピュータービジョンの心理, 産業出版, 東京.)

Murdock, B. B., Jr. (1961) The Retention of Individual Items, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.62, pp.618-625.

Newell, A. and H. A. Simon (1956) The Logic Theory Machine: A Complex Information Processing System, *IRE Transactions on Information Theory*, vol.IT-2, No.3, pp.61-79.

Newell, A. and H. A. Simon (1972) *Human Problem Solving*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Penfield, W. and L. Roberts (1959) *Speech and Brain Mechanism*, Princeton University Press, Princeton. (上村忠男, 前田利男 (1965) 言語と大脳：言語と脳のメカニズム, 誠信書房, 東京.)

Rumelhart, D. E. and J. L. McClelland eds. (1986) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, vol.1-2, MIT Press, Cambridge. (甘利俊一監訳 (1989) PDPモデル：認知科学とニューロン回路網の探索, 産業出版, 東京.)

Rumelhart, D. E. and D. A. Norman (1978) Accretion, Tuning, and Restructuring: Three Modes of Learning, *Semantic Factors in Cognition*, J. W. Cotton and R. Klatzky eds., Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, pp.37-53.

Rumelhart, D. E. and A. Ortony (1977) The Representation of Knowledge in Memory, Schooling and the Acquisition of Knowledge, R. C. Anderson, R. J. Spiro and W. E. Montague eds., Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N. J., pp.99-135.

Schank, R. C. and R. P. Abelson (1977) *Scripts, Plans, Goals and Understanding: An Inquiry into Human Knowledge Structure*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N. J.

Simon, H. A. (1947) *Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Process in Administrative Organization*, Macmillan, New York. (松田武彦, 高柳暁, 二村敏子訳 (1965) 経営行動：経営組織における意思決定プロセスの研究, ダイヤモンド社, 東京.)

Simon, H. A. (1959) Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science, *American Economic Review*, Vol.49, pp.253-283.

Simon, H. A. (1963) Economics and Psychology, *Psychology: A Study of a Science*, Vol.6, S.

Koch (eds.), McGraw-Hill, New York, pp.685-723.

Simon, H. A. (1976) From Substantive to Procedural Rationality, Method and Appraisal in Economics, S. J. Latsis (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp.129-148.

Smith, S. F. (1984) *Adaptive Learning Systems, Expert Systems: Principals and Case Studies*, R. Forsyth ed., Chapman and Hall, New York, pp.169-189.

## 第5章 複雑系及びその研究のための方法論

前章では、人間の行動は限定合理的なものであるため、それを効用の最大化された「状態」として記述することは出来ず、その行動が決定される過程である認知過程を考慮しなければならないことを示した。このように交通行動を捉えた場合、従来までのように均衡という「状態」として交通システムを捉えることはできず、その「プロセス」を考慮することが必要になる。

このように「プロセス」の視点から捉えた交通システムは、均衡分析のような単純なシステムではなく、動的で複雑なシステム、すなわち、複雑系であると考えられる。交通システムが具体的にどのような点において「複雑」であるかは次章以降で明らかにするが、本章では、複雑系とは如何なるシステムであるのか、どのような特性を持つのか、そして、複雑系を研究するためにはどのような方法論を用いるべきであるのか、について述べる。これらを明らかにすることは、複雑系である交通システムを理解する上での概念を提供し、これから研究を進める上での方法論を明らかにすることになると考えられる。

### 5.1 複雑系

#### 5.1.1 複雑系の研究

近年、複雑系という言葉が頻繁に聞かれるようになっている。このような流行ともいえる状況は、Waldrop (1992) の「複雑系」によりその存在が広く知られるようになったのが発端であろう。しかし、複雑系が広範に知れ渡ったにもかかわらず、複雑系とは何か、という問題はそれほど明確になっていないと言える。

複雑系とは、もちろん複雑なシステムのことである。複雑系とは何か、を考える場合、その「複雑」が何を意味するのかが問われる。複雑系における複雑性 (complexity) とは、多くのものが関連することを意味する「込み入った」 (complicated) とは区別される。単に多くのものが関係するだけならば、分離・整理すれば理解することが可能である。しかし、複雑性 (complexity) は、そのように分離することによって理解することが出来ないことを意味している。したがって、複雑系は、多くの場合、部分によってはその全体を



理解することが出来ないシステムと考えられている。このような複雑系においては、全体は部分の総和以上であり、部分を理解するだけで全体を理解することはできず、逆に、部分も全体を理解して初めて分かるようになる<sup>[1]</sup>。以上ような複雑系を対象とする研究における問題意識は、これまでの科学が、対象システムを基本的な構成要素に分解し、その性質を構成要素の性質に還元して説明しようという要素還元論の限界の克服とも考えられる。

しかし、現在の複雑系研究の以前から、全体は部分の総和以上であるという主張はなされていたし、複雑系もしくは複雑性への関心は持たれていた。現在の複雑系の研究の特徴とは何であろうか、従来までと異なる点はあるのだろうか。

Simon (1996) は、複雑性 (complexity) のどの側面に注目したかによって複雑系の研究を三時代に区分している。最初の時代は第一次世界大戦後である。この時代では、全体は部分の集合以上のものであるという主張に焦点が注がれていた<sup>[2]</sup>。次は、第二次世界大戦後のサイバネティクス (Wiener, 1948) や一般システム理論 (e.g. von Bertalanffy, 1971) 等の隆興の時代である。この時代における重要な概念は、フィードバックや階層性である。サイバネティクスにおいて提唱されたフィードバックの概念は、科学の中に「目的」という概念が導入される素地をつくった。また、階層に関しては、それ自体は古くから議論がなされてきたものだが、それが複雑なシステムが進化・生成するのを極めて有利にするものであるなどの特性が明らかにされた (Simon, 1962)。Von Bertalanffy (1971) は著書「一般システム理論」の中で、要素還元論に基づく研究方法を分析的手法 (analytical procedure) と呼び、それが適用できる二つの条件を示している。一つは、要素 (部分) 間の相互作用が全く存在しないか、あるいは一定の研究目的にとって無視できるほど十分に小さいことであり、もう一つは、要素 (部分) の振る舞いを記述する関数が線形であることである。このような条件が成立しないシステムに関しては、分析的手法によってその全てを理解することは出来ないとしている。第三の時代は、主に数値計算やシミュレーションを使用することを通して新しい概念やそのための手段が生まれたことによるものである。カオス<sup>[3]</sup>、創発 (Polanyi, 1966; Klee, 1984)、人工生命 (Langton, 1989) や遺伝的アルゴリズム (Holland, 1975; Goldberg, 1989)、セルラーオートマトン (e.g. 加藤等, 1998) がそれらである。

現在の複雑系研究は Simon (1996) の言う第三の時代であり、その特徴の一つとしては、計算機の使用もしくは計算機による様々な現象やモデルの「構成」 (synthesis) にあると考えられる<sup>[4]</sup>。その顕著な例は人工生命である。人工生命は実際に生命や進化を計算機上に「構成」しようとするものである。遺伝的アルゴリズムやセルラーオートマトンの開発を背景として計算機の使用もしくはシミュレーションにより従来までの還元論が捉え

られなかった複雑な現象を取り扱えるようになったことが現在の複雑系研究の興隆に大きく貢献していると考えられる。

### 5.1.2 複雑系の種類

複雑系は、複雑力学系、複雑適応系、複雑計算系の三つに分類することができる (稲垣, 1997)。複雑力学系は、カオスやフラクタルといった非線形動学であり、複雑計算系とは論理や計算上における複雑さなどを扱うものである。一般に複雑系と呼ばれるものは複雑適応系であり、Gell-Mann (1994) は、それを、自らを取り巻く環境と、自分とその環境との相互作用に関する情報を得て、その情報の中に規則性を見出すこと、そして、それらの規則性を一種の「スキーマ」あるいはモデルへと圧縮し、そのスキーマをもとに現実の世界で行動することである、としている。また、Holland (1995) は Gell-Mann (1994) のいう複雑適応系が集積したものを複雑適応系と呼んでいる。

### 5.1.3 カオスが示した複雑性

今日までの複雑系および複雑性の研究において大きく成功したものの一つがカオスである。カオス研究で得られた知見は、以下で示すように、我々のシステムに対する見方を根本的に変える必要があることを示唆するものである。

カオスにおける特徴的な性質の一つが、決定論的な方程式から生成されるにもかかわらず、その振る舞いは確率論的に見えることである。したがって、必ずしも決定論と確率論を対立するものとして捉えられなくなった。次に、初期値鋭敏性、すなわち、状態は初期値に大きく依存し、初期値の僅かな差が時間とともに指数関数的に広がることである。我々は全く誤差を持たずに観測することは不可能であるため、たとえ現実を正確に記述するモデルを作成することができたとしても、初期値鋭敏性によりその振る舞いを定量的に予測することは極めて困難となることを意味している。第三に、僅かにパラメータを変化させるだけで、例えばカオス状態から周期状態へ変化するというように、その振る舞いが根本的に変化するという「記述不安性」である。

以上のような知見は、従来までの我々の当然としてきた考え方を変革する必要を迫るものである。通常、我々は精緻なモデルを構築し、予測を行おうとする。しかし、いくら精緻なモデルを構築したとしても、我々は無限の精度で観測することはできないため、初期値鋭敏性により長期的な予測は不可能になる。また、僅かなパラメータの変化によ

り劇的にその振る舞いが変化するとするならば、モデルと現実の「距離」（モデルの適合性）を計ることができなくなる可能性も指摘できる。

## 5.2 シミュレーション

複雑系を対象とする研究を行う場合、シミュレーションが極めて重要な役割を果たす。本節では、シミュレーションについて整理し、複雑系を研究するための方法論としてのシミュレーションについて説明する。

### 5.2.1 シミュレーションとは

シミュレーションとは、本来、「模擬」という意味であり、それは現実そのままではなく、そのモデルを構成して、ある現象を模倣することを指すとされる（中西, 1971）。シミュレーションは、ゲーミングなども含んでいるものの、近年ではそのほとんどがコンピュータを用いるものである。したがって、特に断りがない限り、シミュレーションは、コンピュータ上で実験を行う数値的手法を意味することがほとんどである。

### 5.2.2 シミュレーションの目的

シミュレーションの使用目的は主に二つである。一つは対象システムの予測・再現のためであり、もう一つは対象システムの理解のためである<sup>[5]</sup>。

実際のシステムを用いると経済的・時間的コストが多くかかる場合や実験が現実的に不可能な場合、実物に代わってシミュレーション・モデルを用いることになる。このような予測・再現のためのシミュレーションにおいては、出力された値自体が重要であるため、パラメータを統計学的手法によって推定されたものを用いることなどによって、その信頼性を高める努力が必要である。交通工学の分野においても、その種のシミュレーションとしては、従来から交通流のシミュレーションモデルが盛んに研究されてきた。また、近年では、一人一人のアクティビティをシミュレートすることによって交通需要予測しようとする研究も始まっている（e.g. 北村, 1996）。

もう一つは、対象システムを理解するために、システムの本質を抽出した仮定などからモデルを構築するものである。シミュレーション結果は定性的な意味で解釈され、そのモデル化自体は比較的単純なものとなることが多い。交通工学の分野においては、例え

ば、Mahmassani et al. (1991) を挙げることができる。それは情報提供による効果分析のためのシミュレーション分析であり、情報提供を行ったとしても必ずしも全体の平均旅行時間は低下するとは限らないことなどを明らかにしており、得られた知見として重要なものは定性的なものとなっている。

### 5.2.3 シミュレーションの特徴

シミュレーションを現在のような形で初めて用いたのは、1940年代の末の von Neumann と Ulam であったといわれる。彼らは、原子力関係の防護問題を解く必要があったが、実験的に解を求めるには多額の費用がかかるし、解析的に解くには複雑になり過ぎるため、モンテカルロ分析を行った。シミュレーションの主な二つの利点はここに見出される。すなわち、一つは記述性・操作性の高さであり、もう一つは経済的・時間的な節約である。

解析モデルにおいては、研究対象が複雑である場合、定式化における制約からそれを取り扱うことが困難である。このとき、シミュレーションならば容易に記述することができる。しかし、解析モデルのように一般的な知見を引き出すには多くの数値実験を必要とし、また、シミュレーションで構築したモデルは複雑になりがちであり、作成者以外にとって非常に分かりにくくなる危険性もある。これは、解析モデルの利点の裏返しである。したがって、いずれの手法のほうが優れているのかを比較することは出来ず、相互に補完的な役割を持つものである。いずれの手法を用いるのかは研究の視点や目的に依存することになる。

### 5.2.4 一つの研究形態としてのシミュレーション

一般に科学の分野では、主に理論と実験・観測によって研究が進められてきたといえる。すなわち、様々な現象は、実験や観測によって、また、理論の構築によって解明されてきた。これらの研究形態は今後も続くものであるが、近年の計算機の発達に伴い、シミュレーションを用いた研究形態が確立されようとしている。物理学においては、シミュレーションを用いた研究は「計算機物理学（シミュレーション物理学）」<sup>[6]</sup>として市民権を得ている。認知心理学では、人間の思考・推論を計算機の情報処理に見たてた情報処理アプローチが約半世紀前から起こり、シミュレーションモデルの構築が重要視されてきた（Anderson, 1980）。また、社会学、社会心理学や政治学の分野でも、近年、計算機上で仮想社会を構築する試みが行われており、それは「人工社会 (artificial society)」(Esptein & Axtell, 1996)、「マルチエージェントシミュレーション (multi-agent simulation)」(Shoham,



1994) , 「エージェント・ベース・アプローチ (agent-based approach) 」 (Axelrod, 1997) などと呼ばれている。

#### 5.2.5 シミュレーションにおける方法論

##### (1) 「物語」の構成

5.2.1 で述べたように複雑系は還元論的な手法, すなわち, 「分析」 (analysis) 的な手法によっては捉えることができないシステムである。このような系に対しては, 「構成」 (synthesis) な手法が一つのアプローチとなる。構成論的手法は人工生命においては必須の方法論であり, 人工生命では, それは計算機などの媒介体上に生命的な振る舞いを「構成」するというものである (Langton, 1989) 。また, カオス系においても, 構成論的に仮想世界を構築するという手法を用いる研究が行われている (金子・津田, 1996) 。

本研究においても, 複雑系として交通システムを取り扱うために構成論的に「仮想世界」を構築する。このような方法論には従来までのものと大きく異なる点がある。その一つは, この仮想世界は必ずしも現実を出来る限り忠実に反映させようとは試みていないことである。むしろ, 現実とある程度の「距離」があることが意味をもつ場合がある。それは, 小説・演劇といったものを例にとると考えやすい。小説・演劇といったものは, 大抵がフィクションである。しかし, フィクションであるが故に, 真実を真実以上に伝えることが可能となる場合がある。捉えどころのなく複雑なものである社会や人生といったものを我々が捉えようとするときには, 現実を忠実に描写したものより, 編集され, 脚本された一つの「物語」が我々に深い洞察を与える。このような社会や人生といったものは, 本来的には, 一つの法則や理論によって捉えることの出来ないものであり, 我々がそれらを理解することは容易ではない。「物語」は仮想的で, 人工的なものであり, 現実をどれほど反映したものかは十分に明らかではない。しかし, 社会や人生とはどのようなものかを単なる事実の集合より雄弁に真実を語り得る。複雑系を捉える方法論として, 構成論的に構築した仮想世界により「物語」的に捉えるという手法が有効なアプローチの一つであると考えられる。

##### (2) 反事実条件法と可能世界

シミュレーションでは, 仮定や条件を変更し, 再度実験を行うことが比較的容易であり, この特長を生かして, システムにおける因果関係を分析することができる。

この操作性の高さは, 口語的な表現になるが, 「もし仮に～であったら…である」という, 対象システムのそうありえた世界を再現することを容易にする。こうしたそうあり

えた世界は「可能世界」と呼ばれる (Lewis, 1973a) 。可能世界概念は, 反事実条件法 (counterfactual conditional) を用いることによって因果を明らかにすることを可能にする。「もし仮に C が生じなかったとすれば, E は生じなかっただろう」ということから, 「C が E の原因である」と結論付けることが可能となる (Lewis, 1973b) 。確かに, 反事実条件法は, 通常, 科学において用いられる「反証」 (Popper, 1961) とは異なり, 論理的に完全な因果の分析とはならない。しかし, これを用いることによって分析対象が大きく広げることが可能となる。ここに, この方法の有用性を見出すことが出来る。

#### 5.3 複雑系としての社会システム

##### 5.3.1 認知過程の単純性と行動の複雑性

複雑系の研究は主に物理システムに関して行われてきた。しかし, 本研究が対象とする交通システムは物理システムというより, 社会システムである。社会システムは単純な法則で記述することの難しい人間の行動の集積であり, それが比較的容易な物理システムとは大きく異なるシステムであると考えられる。

人間の「行動」はそれ自体複雑なものにみえる。しかし, 人間は, 一つの行動システムとして眺めると極めて単純なものであり, その行動の経時的な複雑さは, 主としてその人間が置かれている環境の複雑性を反映したものに他ならない (Simon, 1996) 。人間は行動システムとして単純であるというのは, 前章で述べたように人間が実際の情報処理において取り扱える量である短期記憶 (作動記憶) は非常に限られたものであり, そこで行われる演算が単純なものであり, 人間の認知過程は単純な演算の繰り返しであることを意味していると考えられる。このような単純なはずの認知過程を持つ人間が複雑に振る舞うのは, その認知過程もしくは認知能力に比べて環境が複雑であるためである。そして, 複雑な環境に対応するために, 長期記憶に貯蔵された環境に対する記憶内容 (知識) が複雑なものとなり, 行動 (振る舞い) も複雑となる。人間の行動が複雑になるのは, 情報処理能力が限られていることが一つの大きな要因であると考えられる。

##### 5.3.2 認知的限界の緩和と複雑性

多数の人間が相互作用を行うシステムは一般に複雑系であり, システムの挙動や他人の行動を予測することは困難となることが多い。しかし, 人間の認知能力は制限されたも

のであるため、複雑で不確実な環境に対してそのような人間が対応することは容易ではない。したがって、人間は個人レベル、また、社会レベルの双方でその限界を緩和しようとする。

人間の個人レベルでの認知的限界の緩和は習慣や学習といったものを通して行われる。記憶システムの観点から見ると、習慣は、どのように行動するのかという手順をその都度再構築するのではなく、それらの手順が一つにまとまったスクリプトを形成し、そのスクリプトが貯蔵されることによって、必要な場合にはそのスクリプトを想起するだけで行動を起こせるようになることと考えられる。このようにスクリプトを形成することは、長期記憶の内容が整理され、情報がチャンク化(chunking)される(情報が一つの塊にされる)こととみなされる<sup>[7]</sup>。習慣化によって、行動の決定はこのようにチャンク化された一つの情報を取り扱うだけで可能となり、情報処理の負担を軽減させることができる。

次に学習であるが、学習は、記憶システムの面から見ると、長期記憶(知識)の形成・再編と解釈することができ、その過程は前章で述べた帰納であると考えられる。学習によって、人間は新たに必要となる情報量を減らすことが可能となる。また、知識はチャンク化された情報であり、その処理のための負荷は大幅に小さいものとなる。

このように習慣・学習とも人間の長期記憶を組織化すること、知識の形成といったものであり、合理性が限定された人間はこのような長期記憶の組織化によりその限界を緩和する。これは、5.4.1 で述べた Simon による人間の行動は環境の複雑性、記憶内容の豊富さにあるという主張と一致する。

人間の認知的限界の緩和は、個人レベルだけではなく、社会レベルでの制度や組織といったものによっても行われる。組織は多くの人間が分担・協力することによって、各自が処理する情報処理量を軽減させる。組織ではそれぞれの人間に立場・役割が割り当てられ、各人は自分に与えられた役割・立場に沿って業務をこなす。組織内の人間は業務内容が限定されることによって、習慣・学習が容易となり、個人レベルでの認知的制約の緩和が促進される。

制度が人々の行動を規定することによって、他人の行動の予測を含んだ行動決定に対する認知的負荷を軽減させたりすることが可能となる。したがって、制度は人間の認知的限界を(社会的なレベルで)緩和するものと言える。最も重要な制度の一つとしては、市場が挙げられる。市場によって我々は財の特性とその価格のみを知るだけで、その他の経済に関する事柄を熟知する必要なく、情報処理の負担が大幅に軽減される。限定合理的な人間にとっての市場の重要性は、それがパレート最適を保証するからというより、むしろ、それが人間の情報処理を軽減するものである(von Hayek, 1945)。

### 5.3.3 社会システムのシミュレーション

近年、社会学や社会心理学を中心とした社会科学の分野において、シミュレーションを用いた研究が進められている。その背景としては、5.4.2 で述べたような組織や制度の形成、利他性や協力性の発生、分業や規範の生成といったような「秩序」というものがなぜ社会に実現するのかという社会科学における根本的な問題に対して、これまで適切な方法論が存在しなかったために、その解明を図ることが出来なかったことがある。そのような中で、シミュレーションが一つの方法論として浮上してきた(高木, 1998)。社会システムに対するシミュレーションは、たいていは限定合理性を仮定した「エージェント」と呼ばれる行動主体の集合からなる仮想的な社会システムを構築するものである<sup>[8]</sup>。このようなシミュレーションは、既に述べたように、「人工社会 (artificial society)」(Esptein & Axtell, 1996), 「マルチ・エージェント・シミュレーション (multi-agent simulation)」(Shoham, 1994), 「エージェント・ベース・アプローチ (agent-based approach)」(Axelrod, 1997) など様々な名称で呼ばれている<sup>[9]</sup>。

本研究も同様のアプローチを採用する。すなわち、多数の行動主体(エージェント)が交通状況を通じて相互作用を行う交通システムをシミュレーションによってモデル化する。行動主体が相互作用することによって、マクロ固有の現象が発生する<sup>[10]</sup>。このようなマクロ現象の形成を個々の交通行動から解明することが本研究の一つの目的である。第一章で述べた「プロセス」とは、このようなマクロ現象の形成過程を意味し、均衡の成立過程を含むものである。

## 5.4 本研究における交通システムへの視点と研究アプローチ

### 5.4.1 複雑系としての交通システム

交通システムは、多くの要素が様々な因果関係の中で形成する動的で複雑なシステム、すなわち「複雑系」であることを否定する人々はあまり多くないであろう。しかし、従来まで行われてきた研究の多くが、還元論的なアプローチによるものである。要素還元論とは、既に述べたように対象システムを基本的な構成要素に分解し、そのシステムの性質をそれら基本的な構成要素の性質に還元して説明するというものである。交通システムを構成する最も重要な要素の一つである行動主体を詳細に分析し、それを単純集計

することによって交通システムを研究しようとするアプローチは、要素還元論に基づいたアプローチである<sup>[11]</sup>。また、少数のパラメータでシステムを記述しようとするものも還元論的な考え方であると言える（金子・津田，1996）。ネットワーク均衡を用いる均衡分析はこの立場に立っていると考えられる。均衡分析では均衡の概念が用いられるが、確率的利用者均衡では多数の行動主体から構成される交通システムをガンベル分布のスケールパラメータによってその状態を記述する。交通システムの状態は、一つの還元されたパラメータによって記述される。利用者均衡においてはそのようなパラメータすら存在しない。このような理由により、本研究では、均衡分析は交通システムを単純系として記述するアプローチとみなしている。

均衡分析において、交通システムを単純系として記述することを可能としているのは、行動主体に対する効用最大化もしくは完全合理性の仮定のためである。本研究では、行動主体に対するそのような理想的な仮定を設けず、より現実的な仮定を置く。したがって、本研究では、交通システムを単純系として記述することを前提とはせず、複雑なシステムとして記述することになる。

#### 5.4.2 本研究におけるシミュレーション・アプローチ

5.3 で述べたように複雑系を対象とする研究においては、シミュレーションが用いられることが多く、本研究でもそれを用いる。既に述べたように、システムにおいて非線形な相互作用が働く場合、それを部分に分離することはできず、基本的にすべて考慮しなければならない。しかし、交通システムでは、無数といってよい程の非線形な相互作用が存在すると考えられる。したがって、シミュレーションの操作性・記述性が高くとも、それらをすべて取り込んだモデルを構築すれば、その結果の解析は非常に手間がかかり、困難となる。しかも、その困難さに比べて得られる知見はさほど多くないと考えられる。そこで、本研究では、まず、交通システムにおいて最も重要な因果関係である行動主体の相互作用を記述した交通システムを構築し、それを基本モデルとする。そして、その基本モデルに重要と考えられる要素・因果関係を徐々に付加しつつ、モデルを拡張していくこととする。これらの手順は、図 1 に示した、1) 基本モデルの作成、2) シミュレート（数値実験）、3) 考察・検証、4) モデルの修正もしくは拡張、である。

基本モデルを作成した上で数値実験を行い、その結果を考察・検証する。シミュレーションでは、シミュレート結果の考察・検討が非常に重要となる。シミュレーションによって再現した交通現象に対して妥当な説明をすることができるならば、それを一つの知見とすることができる。また、得られた結果が一見現実には起こりそうにないものであ

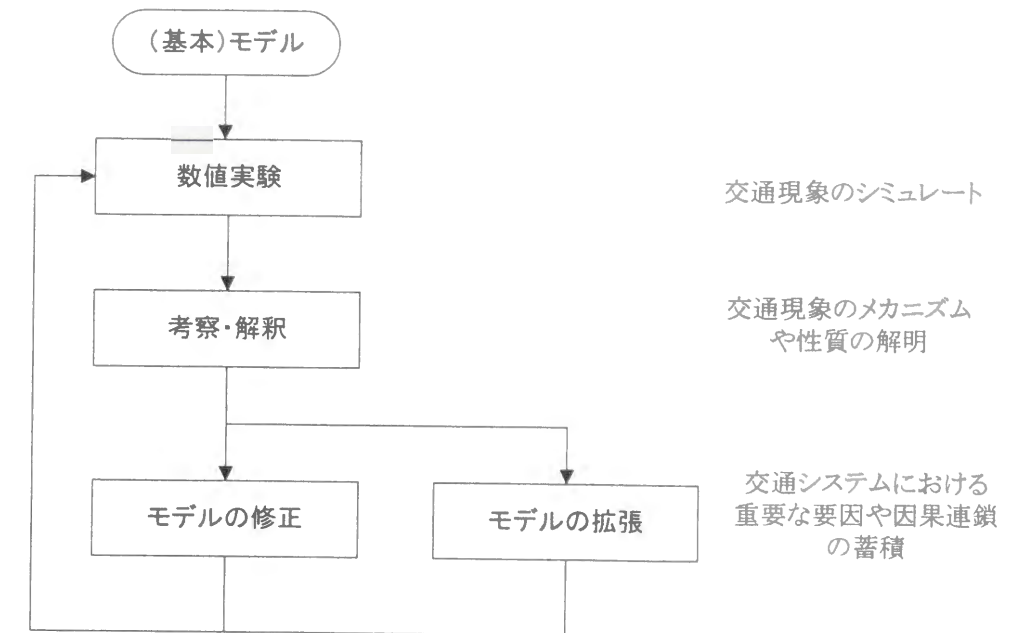


図 5.1 本研究におけるシミュレーションの手順

ても、シミュレーションを行った条件は仮想的なものであり、そのような仮想的な条件下で得られた結果は、現実には起こり得る現象がデフォルメされた形となっている場合がある。そのような結果は、交通システムの理解にとっては、有益な知見となる。数値実験の考察・解釈においては、5.3.5 で述べた反事実条件法等を用いて、因果関係と特定する。それに際して、必要に応じてパラメータや乱数を変更し、再度数値実験を行うこともある。このようにして得られた知見は 5.3.5 で述べた「物語」を形成することになる。

数値実験の考察・解釈の後、モデルをどのように拡張・修正するのかを検討する。数値実験の結果が解釈できないものであったり、妥当でないものであった場合、モデルを修正する必要がある。また、逆に、数値実験の結果が解釈することができ、有用な知見が得られたとしても、そのモデルでは記述することの出来なかった現象の解明やそのモデルの問題点を解消するために、新たな要因や因果関係の付加することなどモデルを拡張する必要がある。このようにして修正・拡張されたモデルに対して、2~4) の手順が繰り返される。これらの繰り返しによる交通システムモデルの構築の過程によって、交通システムの解明が進んでいくものと考えられる。



- [1] 哲学・思想事典によると、「多数の要素から成る系において、要素間の動的な相互作用によって多種多様な部分系が生成されるとき、このような系を<複雑系>という」とされている。しかし、複雑系に対する定義は確立されてはおらず、Nicolis & Prigogine (1989) は、システムが複雑かどうかは主観的な問題であり、カオスや自己組織化などの複雑な現象の解明に焦点を当てる方が自然であると述べている。
- [2] Smuts (1926) は「全体は部分の総和以上」であり、部分によって全体を説明することはできないため、全体論を主張した。
- [3] カオスの発見は、1960 年代に電気工学者の上田や気象学者の Lorenz とされるが、その研究の萌芽は Poincaré まで溯るといわれている。カオスに関しては、Gleick (1987) に平易に述べられている。
- [4] このような考え方・手法は「構成論的アプローチ」とよばれる。したがって、ここでは synthesis の訳を「構成」とした。
- [5] その他として、フライトシミュレータのように飛行の訓練のため、また、コンピュータゲームのように娯楽のためのシミュレーションもある。
- [6] 「物理学辞典」によると、計算物理学は、「これまでの物理学は、自然界の複雑な現象を分析して、その背後にある基本法則を発見してきたが、計算物理学は基本法則、基本方程式から出発して、複雑な物理系の示す現象を解明する」とされている。
- [7] チャンク化の単純な例を挙げると、「2983」という数列を「肉屋さん」というように語呂合わせによって一つの塊にすることである。このように「2983」を「肉屋さん」とすることで、認知的負荷は大きく減少する。
- [8] エージェントは、「感覚器を通して環境を知覚し、効果器を通じて行動する何らかのもの」と定義されている (Russell & Norvig, 1995)。このようなエージェントに関して、その行動が自分自身の経験に基づいてなされるという自律性を強調する場合は自律エージェント (autonomous agent) と呼ばれ、問題解決や学習機能など知性を強調する場合は知的エージェント (intelligent agent) と呼ばれる (石田, 1995)。また、環境に関する知識に基づき、達成すべき目標を目指して行為を遂行するエージェントは、合理的エージェント (rational agent) と呼ばれる。このように個々の機能に注目するのではなく、協調や交渉などの相互作用を研究対象とする場合、相互作用を生じさせる基本単位はマルチエージェントと呼ばれる (石田, 1995)。複雑系をマルチエージェントによって研究することもある (生天目, 1998)。マルチエージェントに対して、ポリエージェントというものも存在する。ポリエージェント (多主体複雑系) では、

人間や組織・集団などの異質で複数の意思決定主体が関与する状況を、内部参照モデルをもった知的決定主体 (エージェント) がネットワーク的に相互作用するシステムと捉え、その構造や相互作用を解明しようとする (木嶋, 1997)。

- [9] これらのアプローチは従来からのマイクロ・シミュレーションとは若干の違いがある。マイクロ・シミュレーションではデータから統計学的に抽出したパラメータ等を用いて個人、世帯や会社の行動を記述するのに対して、人工社会やエージェント・アプローチでは個人または会社等の相互作用によって行動が内生的に記述される。
- [10] このような現象には、「意図せざる結果」があり得る。意図せざる結果とは、「個々の行動が集積することによって個人ないし集合 (社会) に対して生じる結果であり、行動主体が追求する目的には含まれないもの」である (Boudon, 1982)。
- [11] ただし、ここでは、交通行動を詳細に分析する交通行動分析が不必要であることを主張しているのではない。ただ、交通行動分析だけでは、互いに相互作用を行うことによって形成される交通システムの全てを解明することは出来ないということを主張している。

## 参考文献

- Anderson, J. R. (1980) *Cognitive Psychology and Its Implications*, W. F. Freeman and Company, San Francisco. (富田達彦・増井透・川崎恵里子・岸学訳 (1982) 認知心理学概論, 誠信書房. )
- Axelrod, R. (1997) *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Model of Cooperation and Collaboration*, Princeton University Press, Princeton.
- von Bertalanffy, L. (1971) *General System Theory: Foundation Development Applications*, Allen Lane the Penguin Press, London. (長野敬, 太田邦昌訳 (1973) 一般システム理論: その基礎・発展・応用, みみず書房, 東京. )
- Boudon, R. (1982) *The Unintended Consequences of Social Action*, Macmillan, London.
- 物理学辞典編集委員会 (1992) 物理学辞典, 培風館, 東京, pp.565.
- Epstein, J.M. and R. Axtell (1996) *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up*, Brookings Institution Press, Washington D.C.
- Gleick, J. (1987) *Chaos : Making a New Science*, Viking, New York.
- Gell-Mann, M. (1994) *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*, W.H. Freeman, New York. (野本陽代訳 (1997) クォークとジャガー: たゆみなく進化する複雑系, 草思社, 東京)
- Goldberg, D. G. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Massachusetts.
- Von Hayek, F. (1945) *The Use of Knowledge in Society*, *American Economic Review*, vol. 35, pp.519-530.
- Holland, J. H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.
- Holland, J. H. (1995) *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- 稲垣耕作 (1997) 情報処理学会研究報告, MPS, 数理モデル化と問題解決研究報告, 13-4, pp.19-25.
- 石田亨 (1995) エージェントを考える, 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, pp.663-667.
- 廣松渉ほか編: 哲学・思想事典, 岩波書店, pp.1367, 1998.
- 木嶋恭一 (1997) 多主体複雑系の考え方, オペレーションズ・リサーチ, Vol.42, pp.582-586.
- Klee, R. L. (1984) *Micro-Determinism and concepts of Emergence*, *Philosophy of Science*, Vol.51,

pp.44-63.

- 金子邦彦, 津田一郎 (1996) 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店, 東京.
- 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋 (1998) セルオートマトン法: 複雑系の自己組織化と超並列処理, 森北出版, 東京.
- 北村隆一 (1996) 交通需要予測の課題: 次世代手法の構築に向けて, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp17-30.
- Langton, C. G. (1989) *Artificial Life: The Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, pp.1-47.
- Lewis, D. (1973a) *Counterfactuals*, Blackwell, Oxford.
- Lewis, D. (1973b) *Causation*, *Journal of Philosophy*, vol.70, pp.556-567.
- Mahmassani, H.S. & R. Jayakrishnan (1991) *System Performance and User Response under Real-time Information in a Congested Traffic Corridor*, *Transportation Research*, vol.25A, pp.293-307.
- 中西俊男編著 (1971) システム・シミュレーション, 産業出版, 東京.
- 生天目章 (1998) マルチエージェントと複雑系, 森北出版, 東京.
- Nicolis, G. & I. Prigogine (1989) *Exploring Complexity: An Introduction*, R. Piper GmbH & Co., München. (安孫子誠也, 北原和夫訳 (1993) 複雑性の探究, みみず書房, 東京)
- Polanyi, M. (1966) *The Tacit Dimension*, Peter Smith, Gloucester, Massachusetts. (佐藤敬三訳 (1980) 暗黙知の次元: 言語から非言語へ, 紀伊国屋書店, 東京. )
- Popper, K. R. (1961) *The Logic of Scientific Discovery*, Basic Books, New York.
- Russell, S.J. & P. Norvig (1995) *Artificial intelligence: a modern approach*, Prentice Hall, London, Chapter 2. (古川康一監訳 (1997) エージェントアプローチ: 人工知能, 共立出版, 東京. )
- Shoham, Y. (1994) *Multi-Agent Research in the Knobotics Group*, In Castelfranchi & Werner (eds.), *Artificial Social Systems*, Springer, Berlin, pp.271-278.
- Simon, H. A. (1962) *Mechanism of Complexity: Hierarchy System*, *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol.106, pp.467-482.
- Simon, H. A. (1996) *The Sciences of the Artificial*, 3rd ed., The MIT Press, Cambridge. (稲葉元吉・吉原英樹訳 (1999) システムの科学, パーソナルメディア出版, 東京. )
- Smuts, J. C. (1926) *Holism and Evolution*, Macmillan, New York.
- 高木英至 (1998) 社会秩序のシミュレーション, オペレーションズ・リサーチ, Vol.43, pp.389-394.

Waldrop, M. M. (1992) Complexity: the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, Simon & Schuster, New York. (田中三彦, 遠山峻征訳 (1996) 複雑系, 新潮社, 東京.)

Wiener, N. (1948) Cybernetics, Wiley, New York.

## 第 6 章 行動主体の経験の蓄積と交通システムの挙動

### 6.1 経験の蓄積による学習過程の記述

#### 6.1.1 モデル化のアプローチ

第 1 章で述べたように、本研究では、行動主体の学習過程をモデル化した上で交通システムのシミュレーション・モデルを構築する。交通工学では、第 3 章で述べたように、これまでも学習過程を考慮した経路選択に関する研究が行われてきた。これらの研究では、経験した旅行時間の重み付き平均を予測旅行時間もしくは知覚旅行時間とし、予測旅行時間の最も小さい経路を選択するというものが多い (e.g. Horowitz, 1984; 飯田等, 1989)。本章では、これまでの研究と同様に、重み付き平均によって予測旅行時間の定式化を行う。しかし、このような定式化では、重み付き平均の重みが外生的に与えられており、その重みがどのように推計されたかに関して何も言及されていない。そこで、本章では、遺伝的アルゴリズム (Holland, 1975; Goldberg, 1989) を用いて重みを内生的に決定させることにより、より行動論的な基礎を強固にした経路選択モデルの構築を試みる。

#### 6.1.2 遺伝的アルゴリズムの概要

遺伝的アルゴリズムは、環境への適応度が高い個体が高確率で生き残るという生物進化の過程を模倣したサーチ・アルゴリズムであり、その原型は Holland (1975) によって提案された。

遺伝的アルゴリズムでは、まず、サーチしたい内容を遺伝子型にコーディングする。そして、コーディングされた  $N$  個の遺伝子列に対して、図 6.1 に示したような再生産・交叉・突然変異の遺伝的操作を施す。

##### (1) 再生産

生物界では、繁殖力の強い、優れた種が多くの子孫を残すことになる。遺伝的アルゴリズムにおける再生産はこの過程をモデル化したものである。その具体的な方法に関しては、様々なものが提案されているが、以下では、ルーレット戦略と呼ばれる再

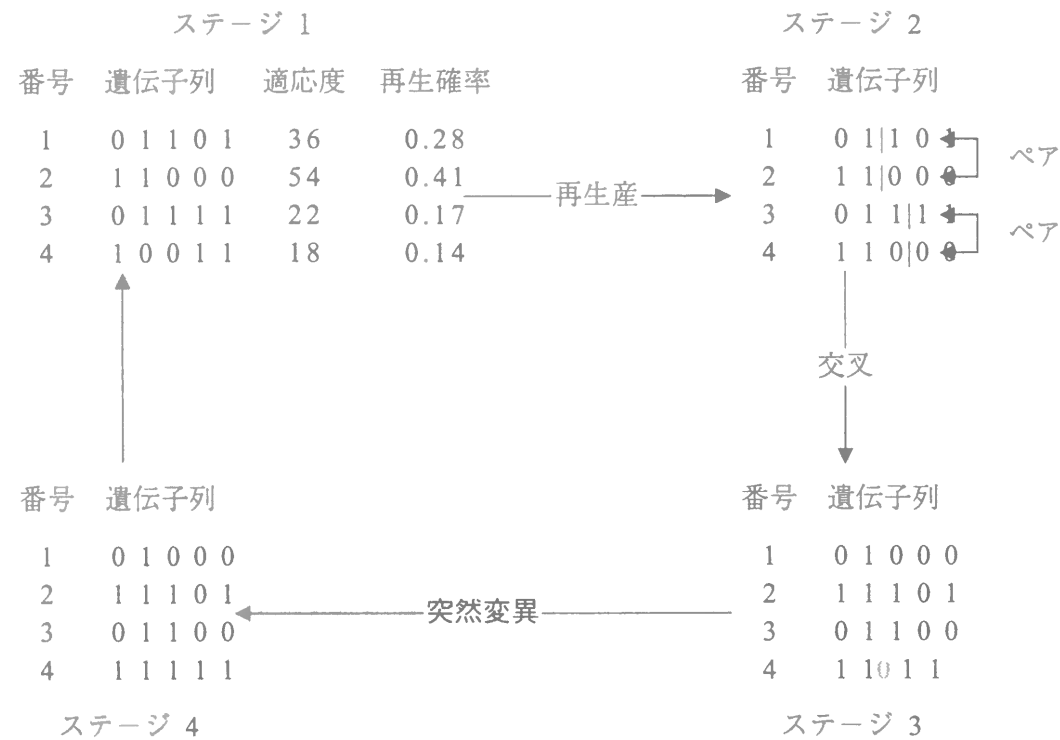


図 6.1 遺伝的アルゴリズムの概要

生産方法を中心に述べる。再生産の方法に関しては、ルーレット戦略の他にも、ランク戦略、エリート保存戦略、トーナメント戦略などがある。

- 1) 各遺伝子列に関して、その遺伝子列がどれ程優れたものであるかを示す適応度  $f$  を計算する。
- 2) 適応度  $f$  からその遺伝子列の再生される確率  $p$  を計算する。ルーレット戦略では、遺伝子列  $i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) の再生される確率  $p_i$  は、以下の式のように算出される。

$$p_i = f_i / \sum_{j=1}^N f_j$$

- 3)  $p_i$  に従って  $N$  個の遺伝子列を生成する（再生産する）。

以上の 1-3) の操作が再生産である（図 6.1 のステージ 1 からステージ 2 を参照）。

## (2) 交叉

交叉は、優れた遺伝子列を生成するためにペアの遺伝子列の一部を入れ替える操

作のことである。このようにして生まれた遺伝子列は親遺伝子の優れた形質を相続することになる。

- 4) 交叉のためのペアをランダムに選出する。
- 5) それぞれのペアに関して、交叉を行う位置を決定し、交叉位置以後の遺伝子を入れ替える。

図 6.1 のステージ 2 では、遺伝子列 1 と 2、3 と 4 がペアと選ばれ、交叉位置は | により示されている。交叉を行った後がステージ 3 である。ここでは、交叉位置は一ヶ所だけであり、それは一点交叉と呼ばれる。一点交叉のほかにも、交叉位置が複数の複数点の交叉や交叉時にマスクを掛ける一様交叉などがある。

## (3) 突然変異

突然変異は、遺伝子を一定の確率で変化させる操作である。突然変異の確率を大きな値に設定すると、再生産や交叉によって残った優れた形質が破壊されることがあるものの、ある程度の突然変異確率より、局所解に陥ることを防ぐことができる。

- 6) 各遺伝子にある確率（突然変異確率）によって変化させる。

図 6.1 では、ステージ 3 からステージ 4 への変化が突然変異であり、遺伝子列 4 の 3 番目の遺伝子が変化している。

## 6.1.3 遺伝的アルゴリズムを用いた学習モデルの妥当性

学習の定義は必ずしも統一されてはいないが、学習は、1) 結果として行動に変化を引き起こす、2) 練習または経験の結果として生じる、3) 比較的永続的な変化である、4) 直接観察することはできない、という性質を持つものとされる（Mednick et al., 1980）。ここで、2) は経験により得た結果から自らの行動を評価し、それを反映させることを意味し、3) は学習にはある程度の継続性が必要であることを意味していると考えられる。以上のように学習を捉えると、学習のモデル化には、1-3) の性質を具備することが必要であろう。逆に、1-3) の性質を持つモデルは学習モデルとみなすことが出来ると考えられる。このような性質を具備した学習をモデル化する方法の一つとして、上に述べた遺伝的アルゴリズムがあげることができ、本章ではそのように学習を記述する。

本章では、遺伝的アルゴリズムによって、重み付き平均による予測旅行時間の重みを内生的に決定する。重み（予測方法）は、選択経路を走行し、その時に経験した旅行時間から、どれだけ予測旅行時間が実際に経験した旅行時間と近いのか、によって



その良否が判断される。6.1.2 で述べた遺伝的アルゴリズムの中では、適応度がその役割を果たす。この適応度に従って、遺伝的操作が行われるため、遺伝的アルゴリズムを用いた学習モデルは、学習の 2) の条件が満たされる。当然のことながら、重みが増えるため、学習の 1) も満たされる。また、遺伝的操作は遺伝子列を毎回全く異なった遺伝子列に変更するものでないため、それには継続性があり、条件 3) も満たされる。このように遺伝的アルゴリズムを用いたモデルは上で述べた学習の条件を満たしており、その意味において、学習モデルとして妥当なモデルと考えられる。

## 6.2 シミュレーションモデルの概要

本章では、図 6.2 に示すような交通システムシミュレーションを用いる。

本シミュレーションモデルは経路選択モデルと交通流モデルから構成されるが、前者は行動主体の予測・経路選択・学習を再現するモデルであり、予測旅行時間モデル、選択経路決定モデル、学習モデルの三つのサブモデルから構成される。後者は経路選択モデルから得られる各行動主体の選択結果を集計して全体の交通状況の再現を図るものである。行動主体は交通流モデルで再現される交通状況を実際に走行することを通じて経験し、それに基づいて学習し、次の知覚旅行時間を形成するものとする。

### 6.2.1 経路選択モデル

#### (1) 予測旅行時間モデル

本章では、既に述べたように従来まで頻繁に用いられてきた旅行時間の重み付き平均として予測旅行時間のモデルを構築する。

個々の行動主体は各経路について複数の旅行時間を想起しているものとする。口語表現をするならば、行動主体は走行経験のうち旅行時間の大きかったものを重視するのか、小さかったものを重視するかなどによって、「この経路は A 分かかるかもしれないし、B 分かかるかもしれない…」と旅行時間に関するいくつかの考え方をもちえているとする。そして、行動主体の想起する複数の旅行時間を予測旅行時間要素  $t_m^k$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ), ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) と呼ぶこととする。ここに、 $m$  は経路、 $k$  は経路ごとに想起する旅行時間のラベルである。これらの予測旅行時間要素はその行動主体の予測旅行時間分布を形成しているとみなせる。

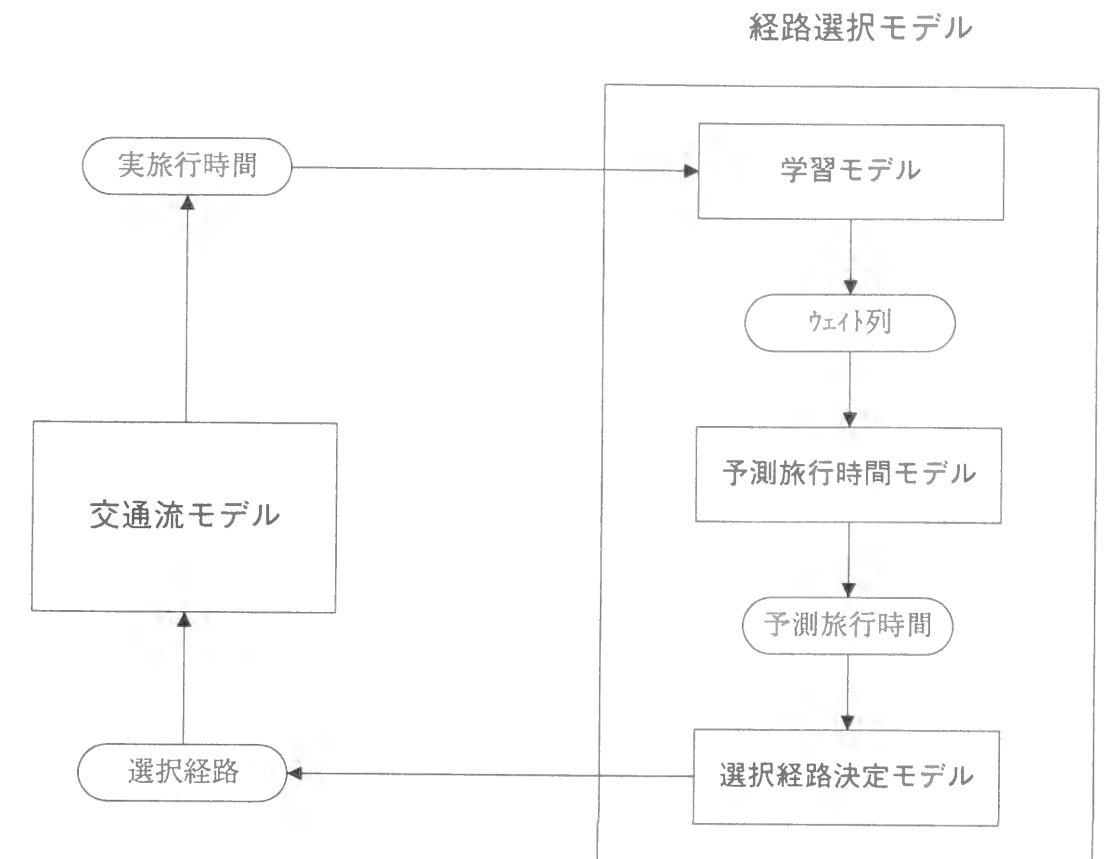


図 6.2 本シミュレーションモデルの概要

以上を基本的な考え方として、予測旅行時間を定式化するにあたり、以下を仮定した。経路数が 2 の場合、図 6.3 のようになる。

- ・行動主体は走行経験として、経路ごとに過去  $n$  回分の旅行時間しか記憶できない。ここで、この経験し、そして、記憶された旅行時間を経験旅行時間と呼ぶ。
- ・個人は、各経路に複数のウェイト列をもち、各ウェイト列によりそれぞれ一つの知覚旅行時間要素を算定する。
- ・各経路の複数の予測旅行時間要素から任意に選んだものをその経路の予測旅行時間とする

なお、記憶された走行経験が  $n$  回分だけとしているのは、行動主体の記憶が限られたものであることや行動主体の忘却効果を表現しようとしたものであるからである。

予測旅行時間要素に関しては、

- ・予測旅行時間要素は経験旅行時間の重み付き平均である。
- ・想定される旅行時間の最小値  $t_{\min}$  と最大値  $t_{\max}$  により定義される区間を  $L$  等分し、それぞれの区間に 1 つずつウェイトを定義する。それら  $L$  個のウェイトをウェイト列と





図 6.3 予測旅行時間

呼ぶことにする。

以上の仮定に基づいて、予測旅行時間要素を以下のように定式化した。

$$\bar{t}_m^k = \sum_{i=1}^L \delta_{ij,m} \cdot w_{i,m}^k \cdot t_{j,m} / \sum_{i=1}^L \delta_{ij,m} \cdot w_{i,m}^k \quad (1)$$

$$\delta_{ij,m} = \begin{cases} 1 & \text{if } t_{\min} + (i-1) \cdot (t_{\max} - t_{\min}) / L < t_{j,m} \leq t_{\min} + i \cdot (t_{\max} - t_{\min}) / L \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

ここで、 $\bar{t}_m^k$ ：経路  $m$  のウェイト列  $k$  により形成される知覚旅行時間要素

$t_{j,m}$ ：記憶している経路  $m$  の  $j$  番目の旅行時間

$t_{0,m}$ ：行動主体が経路について想定する旅行時間の最小値 ( $= t_{\min}$ )

$t_{n+1,m}$ ：行動主体が経路について想定する旅行時間の最大値 ( $= t_{\max}$ )

$w_{i,m}^k$ ：経路  $m$  のウェイト列  $k$  の要素

区間数  $L$  が 3 であり、ある経路の経験旅行時間である  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  がそれぞれ 32 分、27 分、48 分、55 分、41 分である場合、予測旅行時間  $k$  の算出は図 6.4 のようになる。ただし、添え字は省略されている。式 (1) および図 6.4 の中の式におけるウェイト列は旅行時間の予測の考え方を表わしている。例えば、大きい経験旅行時間を重み

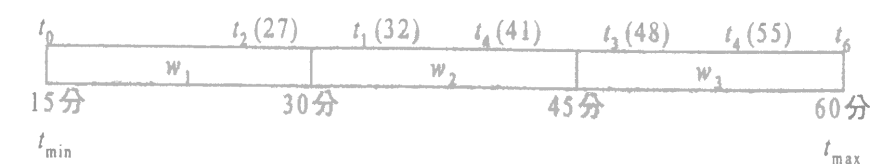


図 6.4 予測旅行時間要素の算出例

付けするウェイト (図 6.4 の場合は  $w_1$ ) が、他のウェイトの比べて相対的に大きい場合は、走行経験のうち旅行時間が大きかったものを重要視するという考え方を表わしている。このような幾通りものの組み合わせによって、さまざまな旅行時間予測の考え方を表現することができる。

## (2) 選択経路決定モデル

選択経路決定モデルは、行動主体は最短経路を利用するとの仮定のもと、予測旅行時間が最小となる経路を算出する。これがその行動主体の選択する経路となる。

## (3) 学習モデル

本研究では、各行動主体は各経路の実旅行時間をよりの確に予測することを目指してウェイト列、すなわち、「旅行時間を予測する考え方」を変化させる。そして、本来的に遺伝的アルゴリズムが遺伝子の環境への適応をモデル化したものである点に着目して、ウェイト列を遺伝子列と見なし、実旅行時間への適応 (経験した旅行時間に基づくウェイト列の改訂) を遺伝的アルゴリズムを用いて行う。

個人ごとに遺伝子列とみなしたウェイト列に対して以下の手順で遺伝的アルゴリズムを適用する。

- 1) 再生産：経験旅行時間に近い予測旅行時間を算出することが出来たウェイト列を優れたウェイト列とみなし、ウェイト列の適応度を以下の式に従って計算する。

$$f_m^k = -a \cdot |t_m - \bar{t}_m^k| + b \quad (2)$$

ここで、 $f_m^k$ ：経路  $m$  におけるウェイト列  $k$  の適応度

$t_m$ ：経路  $m$  の経験旅行時間

$\bar{t}_m^k$ ：ウェイト列  $k$  が算出する経路  $m$  の予測旅行時間

$a, b$ ：正の定数

各ウェイト列の適応度を計算した後、6.1.2 で述べたルーレット戦略によって再生産を行う。

- 2) 交叉：より優れたウェイト列が生成されるために、再生産によって生き残った全ウェイト列の中から任意に選んだ  $c$  組のペアについて、一点交叉を行う。
- 3) 突然変異：突発的に優れたウェイト列が生成されるために、交叉の後、確率  $p_m$  で各ウェイトの値を変化させる。

予測旅行時間要素がドライバーの予測旅行時間分布からの標本であるとき、上に示した遺伝的アルゴリズムによるウェイトの更新することによって、Horowitz (1984) や飯田ら (1989) の研究では一定であった知覚旅行時間分布の分散が内生的に決定されることになる。

### 6.2.2 交通流モデル

本研究では、出発時刻選択を考慮しないため、同一時間帯に出発する行動主体のみを取り扱う。したがって、交通流モデルは行動主体の経路選択結果を集計して経路交通量を求め、それを用いて行動主体が経験する旅行時間を算定するだけとし、以下のBPR 関数によって、交通量  $q$  と旅行時間  $t$  の関係を表わすこととする。

$$t = t_f \cdot \left\{ 1 + \alpha \cdot (q/C)^\beta \right\} \quad (3)$$

ここで、 $t_f$ ：経路の自由走行時間

$C$ ：経路の交通容量

$\alpha, \beta$ ：パラメータ

### 6.3 数値実験

上述のシミュレーションモデルを用いて、1 ペアの起終点 (OD) を同質な 2 経路（ここでは経路 1 と経路 2）で結ぶ図 6.5 のようなネットワークに、200 人の行動主体を繰り返し走行させる数値実験を行った<sup>[2]</sup>。シミュレーションで用いたパラメータは以下の通りである。交通流モデルでは、両経路とも、 $t_f = 16.0$ 、 $C = 200$ 、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 2$ 、行動主体の記憶については、 $n = 3$  とし、個人の持つ各経路の予測旅行時間用素数  $K =$

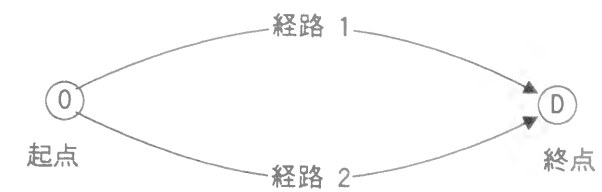


図 6.5 数値実験で用いる交通ネットワーク

10、旅行時間の分割数  $L = 10$ 。遺伝的アルゴリズムに関しては、 $a = 1$ 、 $b = 20$ 、 $c = 1$ 、 $p_m = 0.01$  である。

初日では行動主体は走行経験を全くもたない。しかし、式 (1) には外生的に与えられる旅行時間の最大値と最小値が含まれているため、ウェイトの初期値さえ与えられれば、行動主体は予測旅行時間を算出し、選択経路を決定することができる。初期ウェイトは正規乱数により与えられているが、本章では、その分散が 0.5, 1, 1.5, 2 である 4 ケースを掲載する。図 6.6 は各ケースにおける経路 1 の交通量の推移を示している。これによりいずれも最終的にはほぼ収束していることが分かる。ケース 3, 4 では経路間の旅行時間がほぼ等しい状態（利用者均衡）に収束しているが、ケース 1, 2 ではそれに収束していない<sup>[3]</sup>。また、ケース 1, 2, 3 のいずれもが、収束状態を迎えるまでに交通量が大きく振動しており、その振幅がある日を境として増減している一方で、初期ウェイト分散の大きなケース 4 においてはこの振動が特に見られなかった。これ

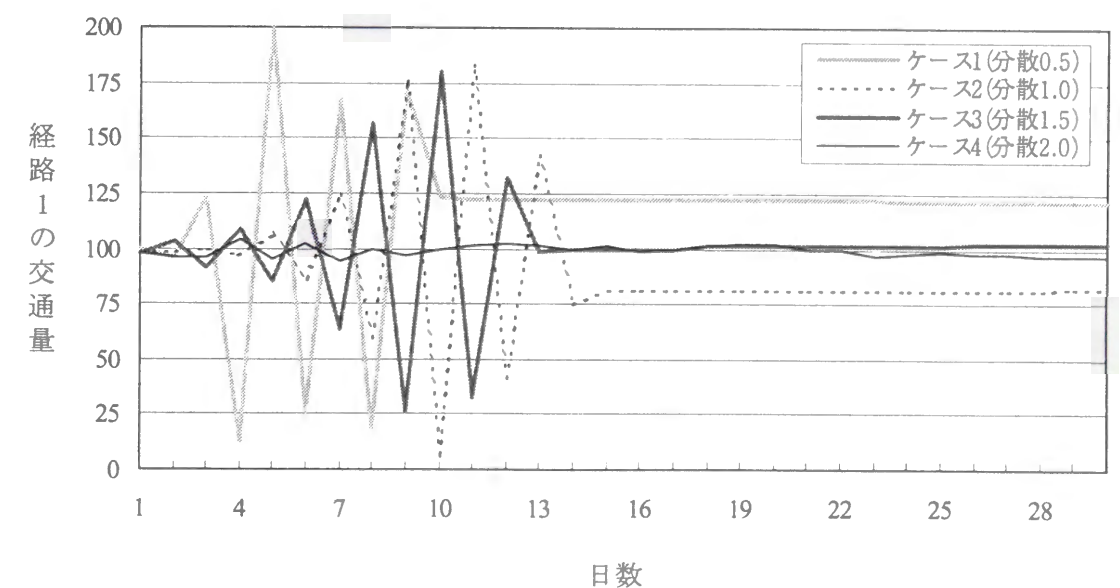


図 6.6 各ケースにおける経路 1 の交通量の推移

らのシミュレーション結果は、1) 交通システムにおいて必ずしも利用者均衡が成立するとは限らないこと、2) 主体間の異質性の度合いによってシステムの挙動が異なり、収束状態も一意には決定されないこと、3) 均質な行動主体だけで構成されるシステムよりは、多様なドライバーが多く存在するシステムの方が安定すること、を示唆しているものと考えられる。

システムの状態変化を考察するために、各ケースの各日での予測旅行時間の散布図を用いる。図 6.7.1 から図 6.7.20 は、ケース 1 の初日から 20 日目までの、そして、図 6.7.21 と図 6.7.22 はそれぞれケース 1 の 30 日目と 50 日目の予測旅行時間分布の散布図を表わす（散布図は章末に掲載）。予測旅行時間散布図の一つのプロットはある行動主体のある日の予測旅行時間を表わしている。図の横軸は経路 1 の予測旅行時間、縦軸は経路 2 の予測旅行時間を表わしている。ケース 2, 3, 4 に関しても、同様に図 6.8.1 から図 6.8.22, 図 6.9.1 から図 6.9.22, 図 6.10.1 から図 6.10.22 がケース 2, 3, 4 の 1~20 日, 30 日, 50 日の予測旅行時間の散布図である（全ての散布図は章末に掲載）。

正規乱数で初期のウェイト値を与えたため、図 6.7.1, 図 6.8.1, 図 6.9.1 および図 6.10.1 から分かるようにいずれのケースも初日の予測旅行時間分布は互いに相似な一つの集団を形成している。しかし、図 6.7.1 から図 6.10.22 が示すように時間が経過して収束状態に至る過程で、「状態 1」：初日の形状がほぼ保存されている状態、「状態 2」：いずれか一方の経路の旅行時間を長く見積もっている個人から構成される 2 つの集団が形成される状態、といういずれかの状態に分岐することが分かる。なお、システムが「状態 2」に収束してからは、行動主体による経路変更はほとんど生じていない。

交通システムの挙動（経路旅行時間の変化）は行動主体の走行経験の蓄積に大きく依存している。以下にケース 1 について説明する。各散布図には対角線が記入してあるが、対角線よりも左上にあるプロットは経路 1 の方が経路 2 よりも旅行時間が小さいものであるため、それらのプロットは経路 1 を走行する行動主体である。逆に、対角線よりも右下にあるプロットは経路 2 を走行する行動主体である。

図 6.7.1 および図 6.7.2 では両経路を選択する行動主体の数はほぼ同数であり、両経路の交通量もほぼ等しい（図 6.6 参照）。図 6.7.3 では、対角線よりも左上のプロットが若干多いため、3 日目は経路 1 の交通量が多くなる（図 6.6 参照）。3 日目で経路 1 を走行した行動主体は経路 1 の旅行時間は大きいということを経験するため、彼らの次の日（4 日）の経路 1 の予測旅行時間は大きくなる。図 6.7.4 は図 6.7.3 よりも経路 1 の旅行時間が大きいプロットが増加しており、プロット全体は右へ移動していることが容易に分かる。対角線よりも右下のプロットは経路 2 を走行する行動主体である

ため、図 6.7.4 から分かるように 4 日目は経路 1 を走行する交通量は少なくなり、経路 2 を走行する行動主体が多くなる（図 6.6 参照）。4 日目に経路 2 を走行した行動主体は経路 2 の旅行時間は大きいことを経験し、彼らの次の日（5 日）の経路 2 の旅行時間の予測値は大きくなる。したがって、5 日では経路 2 の予測旅行時間は 4 日目よりも大きくなり、図 6.7.5 は図 6.7.4 よりプロット全体が上へ移動している。このような繰り返しが 9 日目まで続く。走行する行動主体が多い経路の旅行時間は大きくなり、その大きな旅行時間を経験する行動主体は多いため、旅行時間が大きく変動する期間は両経路の予測旅行時間は徐々に大きくなる。図 6.7.4 から図 6.7.5 へはプロットは上へ移動し、図 6.7.5 から図 6.7.6 へはプロットは右へ移動し、図 6.7.6 から図 6.7.7 へはプロットは上へ移動し、図 6.7.7 から図 6.7.8 へは右へ、図 6.7.8 から図 6.7.9 へは上へ移動している。この間、経路旅行時間は大きく変動するため、旅行時間の予測は困難となり、行動主体間の予測旅行時間のばらつきは大きくなり、散布図のプロットの散らばりが大きくなっている。

このようにして迎えた 10 日目では、プロットはかなりばらつくとともに、既に多くの行動主体の予測旅行時間は両経路ともかなり大きくなり、それ以上予測旅行時間が大きくなりにくくなるため、以前のようにプロット全体が上または右へ移動し、極端に一方の経路に行動主体が偏ることがなくなっている。図 6.7.10 から対角線の左上と右下のプロット総数はさほど変わらないことが分かる。この時の経路 1 の交通量は 123 で旅行時間が 22.1 であり、経路 2 の交通量が 77 で旅行時間が 18.4 となる。図 6.7.10 の対角線よりも左上のプロットは経路 1 を走行した行動主体であるが、経路 1 を走行した行動主体は経路 1 の旅行時間が 22.1 であるため、彼らの予測旅行時間を表わすプロットは左へ移動する（22.1 に近づく）。逆に、対角線よりも右下のプロットは経路 2 を走行した行動主体であり、経路 2 の旅行時間は 18.4 であったため、プロットは下へ移動する。そして、図 6.7.11 のような 11 日目の予測旅行時間となる。10 日から 11 日の変化ではプロット自体は移動しているものの、対角線よりも左上および右下のプロットの総数は変化していないため、交通量の変化は生じない。このようにして旅行時間の変動は 10 日以降、停止することとなった。

停止後は、対角線よりも左上の行動主体は経路 1 しか走行しないため、経路 1 の旅行時間 22.1 に近づくが、経路 2 は走行しないため、経路 2 の予測旅行時間は更新されず、大きいままである。逆に、対角線よりも右下の行動主体は経路 2 のみを走行するため、経路 2 の予測旅行時間は 18.4 に近づくが、経路 1 は走行しないため、経路 1 の予測旅行時間は更新されず、大きいままとなる。このようにして行動主体が 2 つのグループに分かれる「状態 2」が形成される。ケース 2, ケース 3 も同様である。



一方、ケース4ではもともと予測旅行時間のばらつきがある程度大きいため、一方の経路に行動主体が集中することはなく、旅行時間の大きな変動が生じない。したがって、初期状態からあまり変化しない「状態1」が持続する。

行動主体は、大きな経路旅行時間を経験することで、その経路の旅行時間はかなり大きいと知覚し、そのように予測すると、以後その経路の利用を差し控えるために、その経路の知覚・予測状況は更新されない。したがって、そのような極端な走行経験が行動主体の知覚・予測状態を支配し続けることになった。このような行動主体の認知状態を本研究では「思い込み」と呼ぶこととする。ここで、「思い込み」(delusion)は、初期の走行経験の記憶によって行動主体が一方の経路の旅行時間を実際よりもかなり大きいと知覚・予測している状態であり、より一般的にいうと、自らの経験や獲得した情報が極端であったなどのために、それらが記憶に残り続け、しばしば実際とは異なる知覚・予測状態となる現象のことと言える。一方、ケース4のように多様な個人がもともとある程度以上存在する、すなわち、一方の経路の旅行時間が長いとの多少の「思い込み」をもつ個人が当初から多く存在する場合には、図6.6が示すように初期の交通量の変動が少なく、個々の行動主体の予測旅行時間がほとんど更新されないため、結果的に図6.10.22などが示すように当初の予測旅行時間の分布が保存されるのである。

「思い込み」が生じるのかどうかは、行動主体が大きな旅行時間の変動を経験したか否か、すなわち、システムが極端な交通量の振動を起こしたのか否かに依存している。また、その交通量の極端な振動の有無は初期のウェイトの分散、つまり行動主体の異質性に依存している。したがって、このシステムは、状態が過去の出来事や初期値に依存するという「経路依存性」(e.g. Arthur, 1988)をもつシステムといえることができる。そして、行動主体の「思い込み」は取り消すことができないものであるため、システムは時間的に不可逆でもあるといえる。

## 6.4 結果の考察

### 6.4.1 思い込み均衡

既に述べたように、行動主体は予測旅行時間の最小となる経路を選択するため、ケース1, 2および3での収束状態(「状態2」)は、確率的利用者均衡(e.g. Sheffi, 1985)と同じく、「自分だけが経路を変更することによって、旅行時間を短縮することが

できないと行動主体が認知している状態」である。したがって、ケース1, 2および3での収束状態は均衡といえる。

しかしながら、この均衡は、一意性をもたないとともに、どのような状態に収束するかは過去の出来事や初期値に依存するなど従来までのネットワーク均衡の概念と全く性質が異なる<sup>[4]</sup>。ここでは、それらと区別するために、この均衡を「思い込み均衡」(deluded equilibrium)と呼ぶことにする。「思い込み均衡」は、「行動主体が上述の思いこみの状態にロックイン(Arthur, 1988)され、経路変更によって旅行時間を短縮することができないと認識している個人がシステム内で多数を占めることでシステムが安定する状態」とする(中山ら, 1999)。

「思い込み均衡」は交通機関選択においても存在する現象である可能性を指摘できる。もし自動車交通と公共交通の間において「思い込み均衡」が成立しているならば、たとえ公共交通のサービス水準を向上させたとしても、自動車交通から公共交通への転換をさほど期待できないであろう。自動車利用者は、公共交通は不便であると思い込んでおり、もはやそれには目もくれないためである。

以上のような「思い込み」は、阪神高速道路の堺線の通行止め時にアンケート調査を行った藤井等(1999)によって支持されている。この分析では、平常時では高速道路を利用するが、高速道路が通行止めのためにやむを得ず公共交通機関を利用した自動車通勤者に対して出発前に公共交通機関の旅行時間の予想値を尋ね、それと実際にかかった旅行時間を比較したところ、前者のほうが後者よりも統計学的に大きかった。

### 6.4.2 交通システムの複雑さ

均衡分析では、個々の行動主体に対して完全情報と最短経路選択の2つが仮定されるならば、利用者均衡の成立が保証される。また、それを適切に最適化問題として定式化すれば、一意な均衡解が得られるため、個々の行動主体の認知や意思決定が直接的に扱われる必要がない。このような均衡分析は、解析的に取り扱える程に交通システムを単純に捉えようとしたものであるともいえる。一方、本研究では、均衡の成立を前提とせずに、個々の行動主体の経験、記憶や予測、そして、経路選択と意思決定構造の学習という種々の要素をモデル化し、それを集計化して日々の交通状態を算出した。すなわち、均衡成立のための強い前提の下で現象を単純に記述することを避けて、交通システムをできるだけ「複雑な」ままに記述することを目指したものである。このアプローチにより、個々人の行動と交通ネットワークにおける現象の間の新たな関係を明らかにすることができた。すなわち、本研究のシミュレーション分析の結果、



個々人が交通状況に関して「思い込み」を起こすことで均衡が成立することがある可能性が示された。このような「思い込み均衡」は従来までのネットワーク均衡と全く異なる性質を持つ均衡である。それは一意的ではなく、経路依存的に決定されるという「複雑」な性質を持つ。

このように本章では、交通システムを複雑系として捉える視点が有効であることを主張するが、その理由は、単に交通システムが複雑系であるからというものだけではなく、それを複雑系として取り扱わなければ、交通システムの本質的な性質のうちのいくつかを見逃すことになりかねないからである。その例として、本章では、シミュレーション実験を通して、行動主体の（初期の）異質性によってシステムの収束状態が分岐するとともに、システムは「経路依存性」をもつということを示した。ただし、6.2 および 6.3 で述べたようにシミュレーション自体は非常にシンプルなものであるため、このような結果は交通システムの一側面を表わしたものに過ぎない。しかし、従来までのネットワーク均衡の概念では不問にされてきた交通システムの複雑な性質について、その一側面を明らかにすることができたことは、複雑系として交通システムを見ることの必要性を指摘する上においては、いくらかの意味をもつものであると考えられる。

さらに、交通計画を検討する際にも、複雑系として交通システムを捉えるという視点は有効であると考えられる。例えば、情報提供政策を取り上げると、均衡分析では一意な均衡解が前提とされているために単に提供する情報の内容だけが問題となると思われる。しかし、交通システムを複雑系として捉える立場において、本研究で得られた知見からは「思い込み均衡」が生じることがありえると指摘できるため、適切な時期に適切な情報を提供しなければ、非効率な「思い込み均衡」に陥り、その後、情報提供の効果があまり現れないなどの可能性を個々の行動から説明するというミクロな視点から指摘できる。このように交通システムを複雑系として捉えることによって、木目の細かい交通政策に向けてのミクロな視点から基礎的な知見を得るが期待できる。

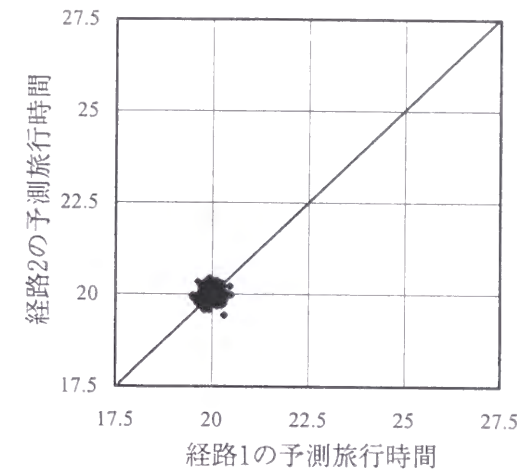


図 6.7.1 ケース 1 の 1 日目の散布図

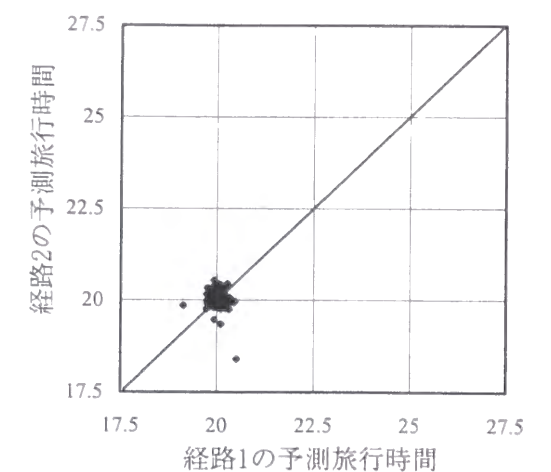


図 6.7.2 ケース 1 の 2 日目の散布図

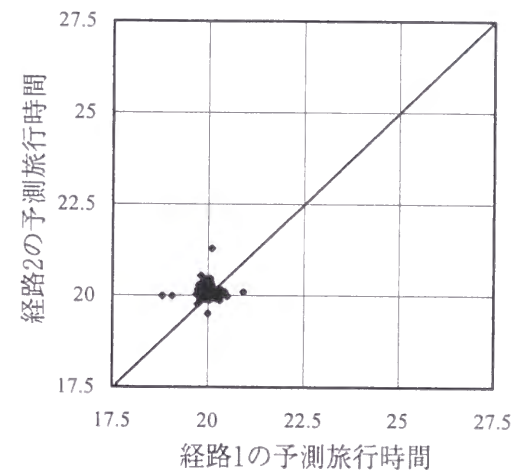


図 6.7.3 ケース 1 の 3 日目の散布図

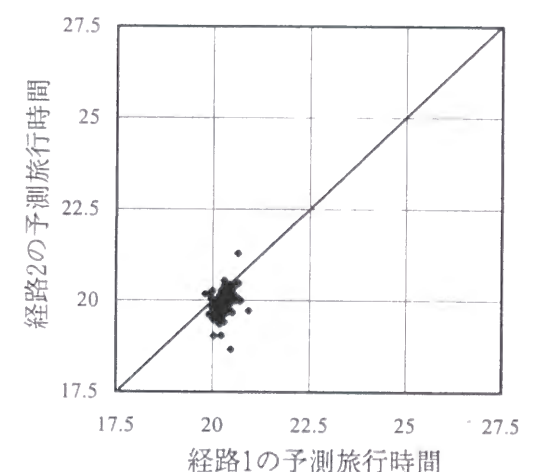


図 6.7.4 ケース 1 の 4 日目の散布図

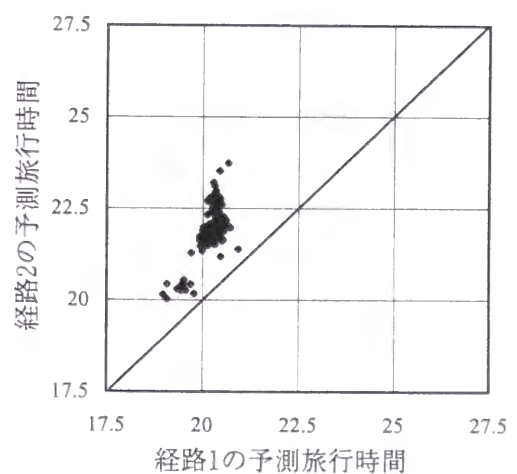


図 6.7.5 ケース 1 の 5 日目の散布図

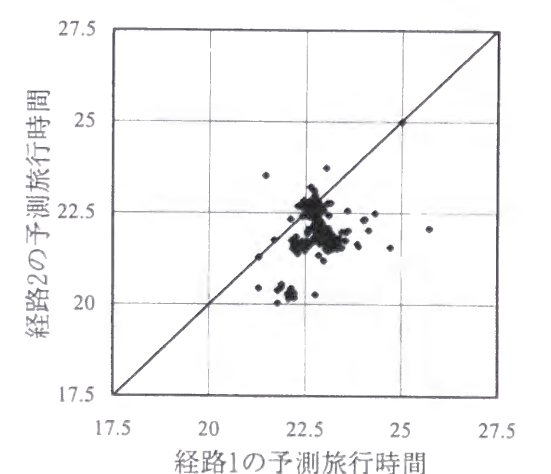


図 6.7.6 ケース 1 の 6 日目の散布図

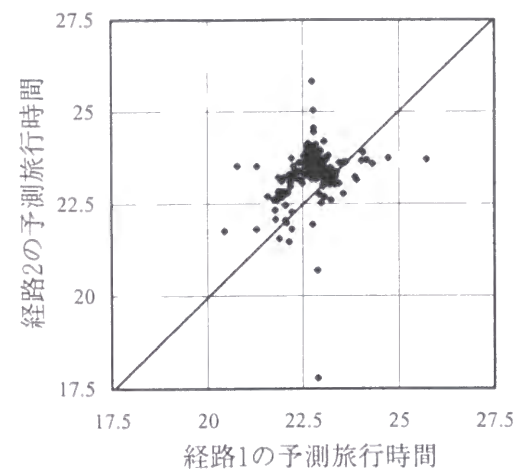


図 6.7.7 ケース 1 の 7 日目の散布図

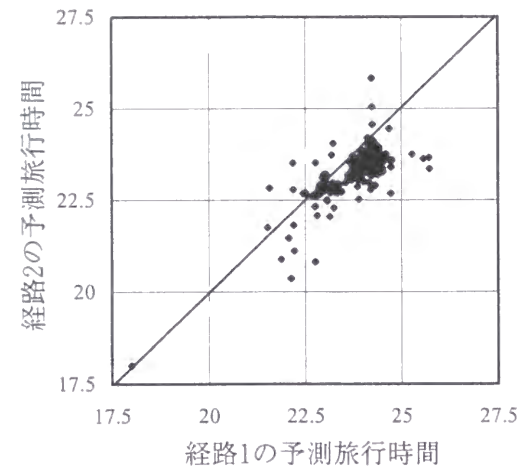


図 6.7.8 ケース 1 の 8 日目の散布図

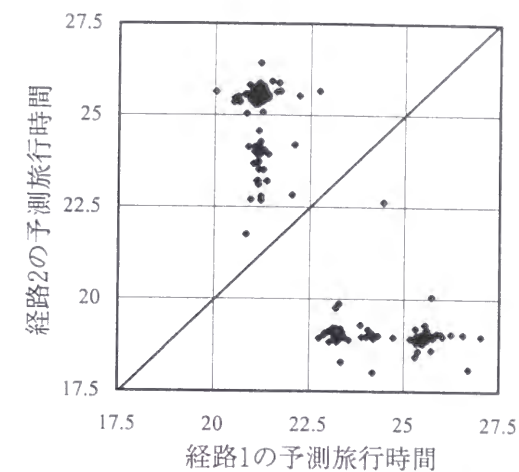


図 6.7.13 ケース 1 の 13 日目の散布図

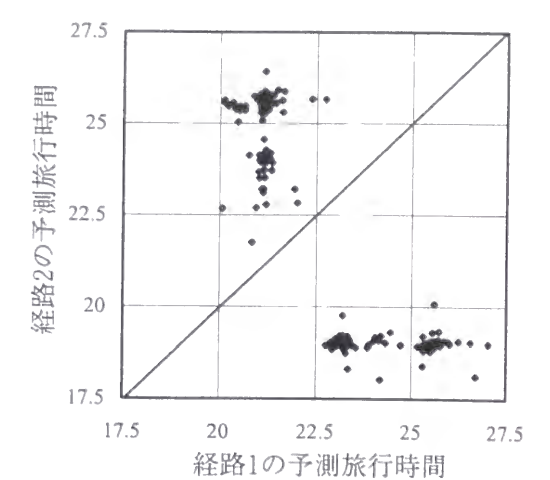


図 6.7.14 ケース 1 の 14 日目の散布図

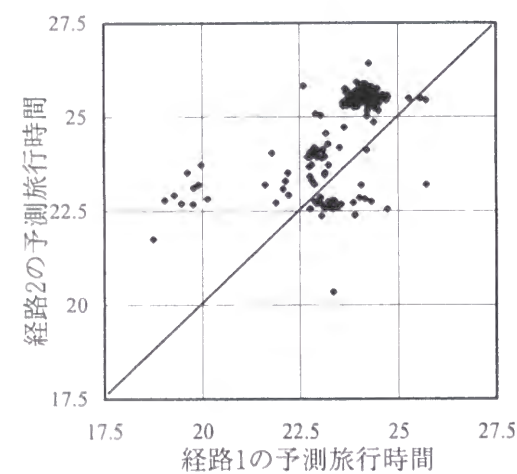


図 6.7.9 ケース 1 の 9 日目の散布図

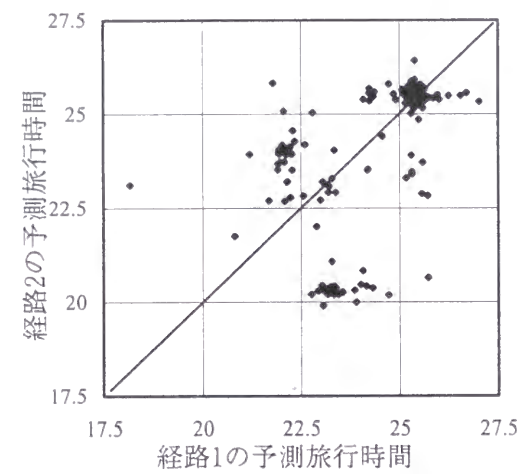


図 6.7.10 ケース 1 の 10 日目の散布図

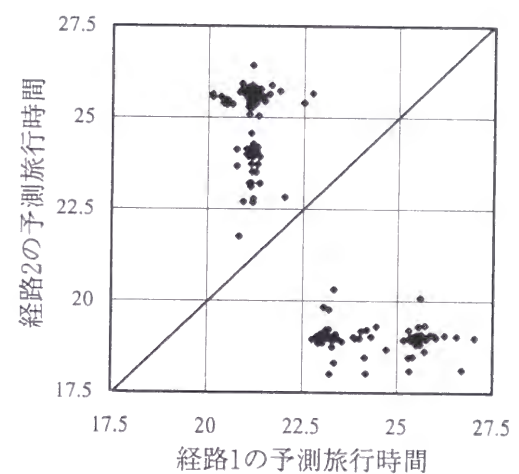


図 6.7.15 ケース 1 の 15 日目の散布図

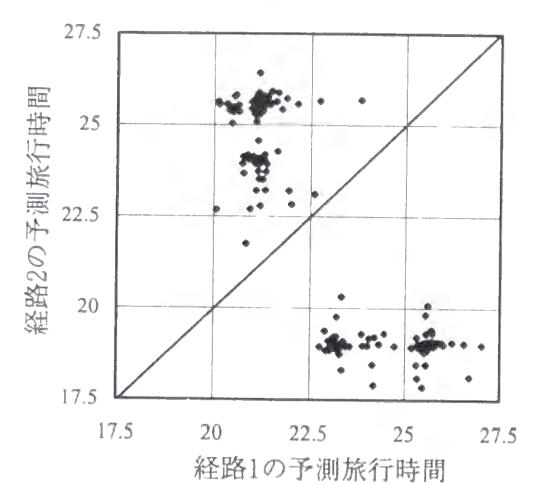


図 6.7.16 ケース 1 の 16 日目の散布図

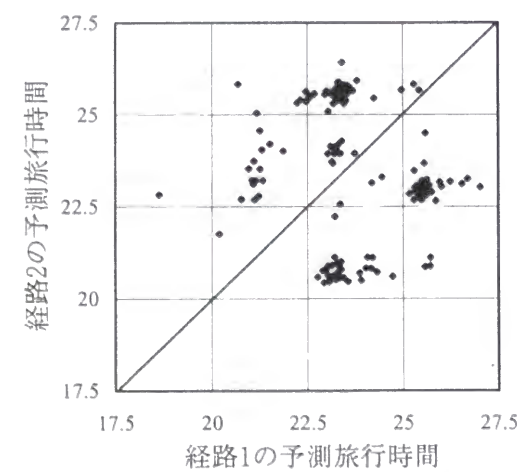


図 6.7.11 ケース 1 の 11 日目の散布図

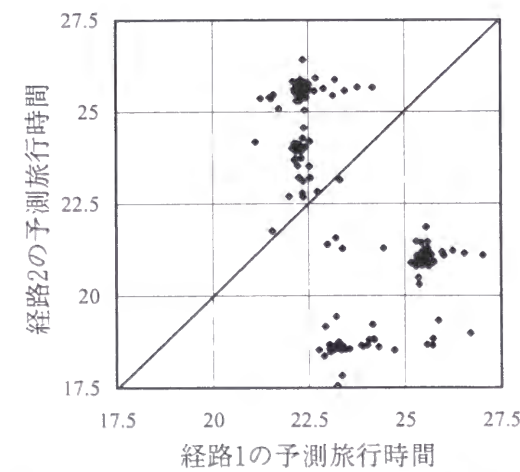


図 6.7.12 ケース 1 の 12 日目の散布図

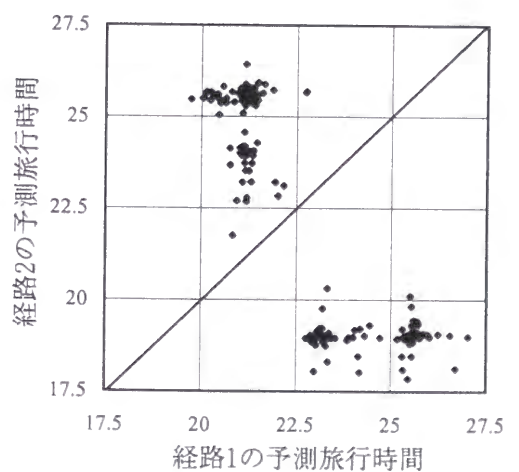


図 6.7.17 ケース 1 の 17 日目の散布図

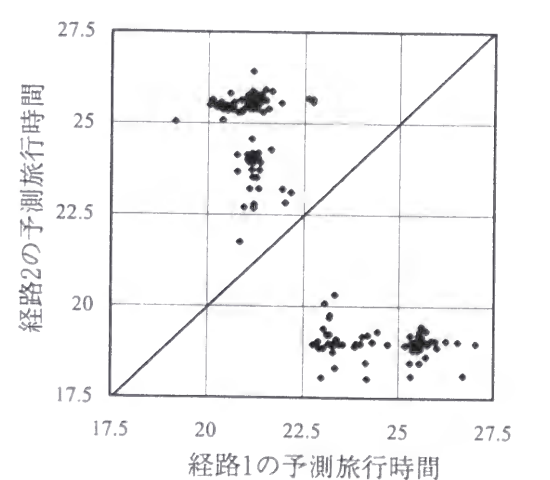


図 6.7.18 ケース 1 の 18 日目の散布図

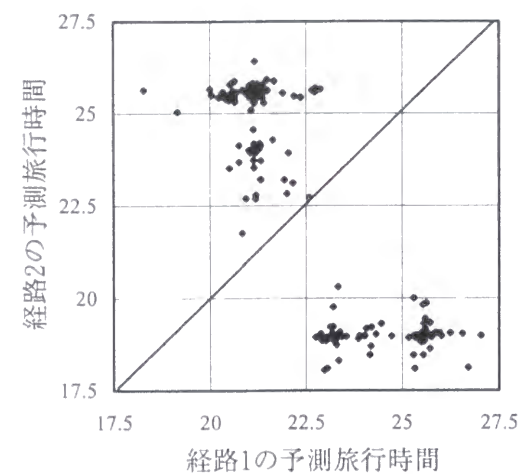


図 6.7.19 ケース 1 の 19 日目の散布図

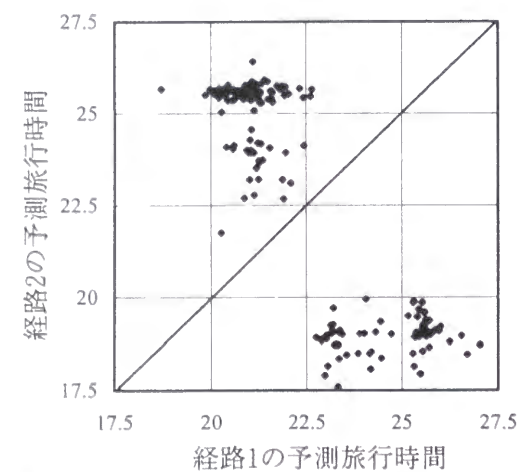


図 6.7.21 ケース 1 の 30 日目の散布図

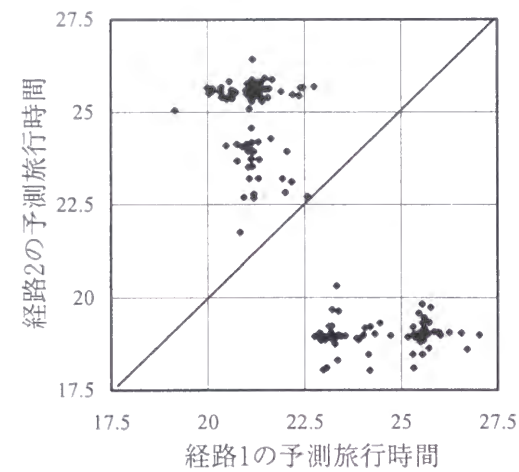


図 6.7.20 ケース 1 の 20 日目の散布図

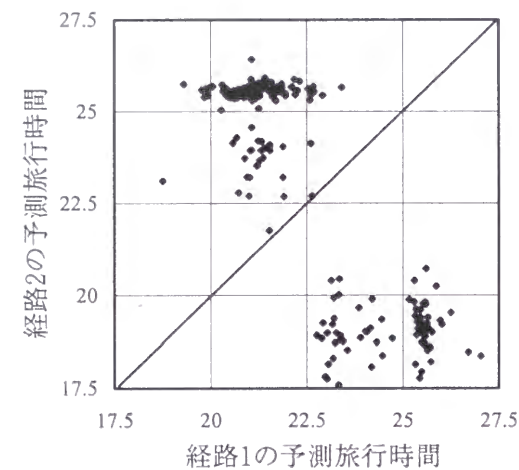


図 6.7.22 ケース 1 の 50 日目の散布図

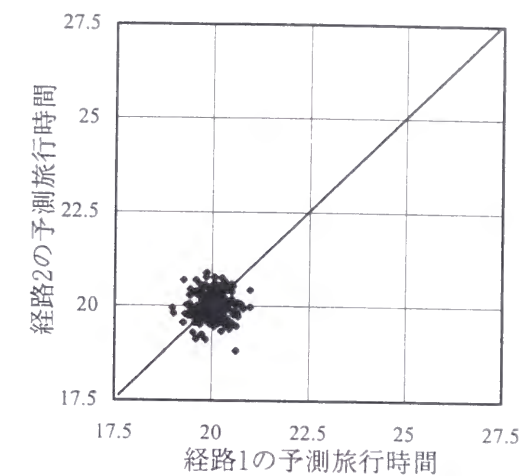


図 6.8.1 ケース 2 の 1 日目の散布図

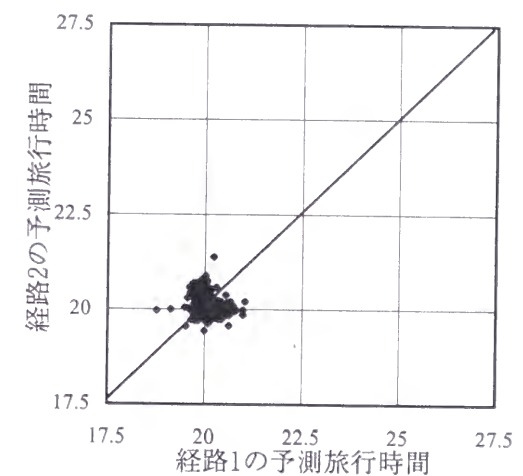


図 6.8.3 ケース 2 の 3 日目の散布図

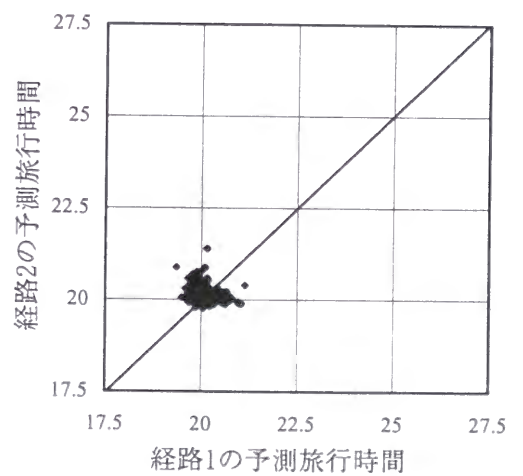


図 6.8.5 ケース 2 の 5 日目の散布図

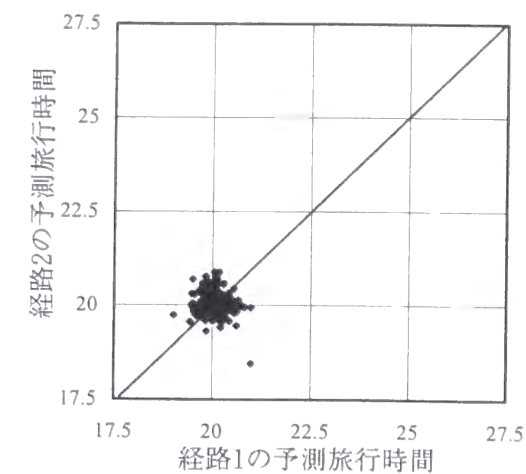


図 6.8.2 ケース 2 の 2 日目の散布図

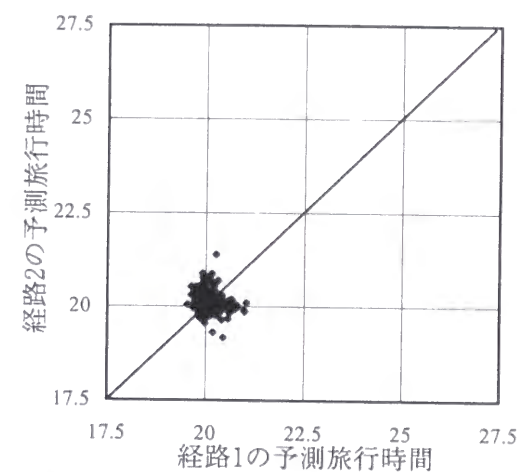


図 6.8.4 ケース 2 の 4 日目の散布図

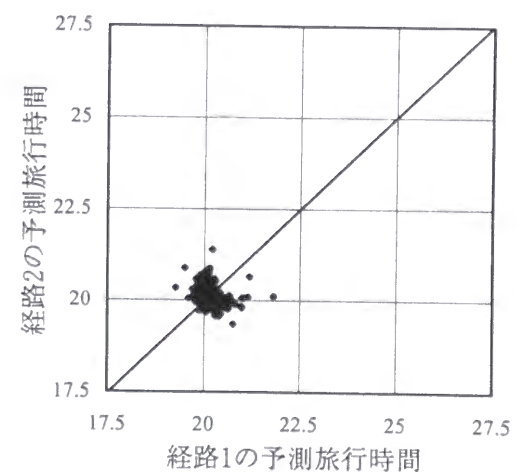


図 6.8.6 ケース 2 の 6 日目の散布図



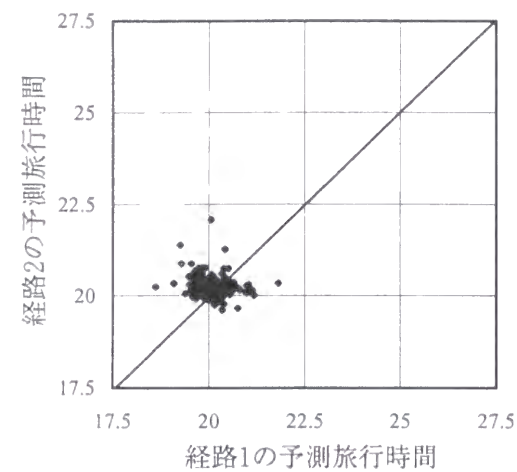


図 6.8.7 ケース 2 の 7 日目の散布図

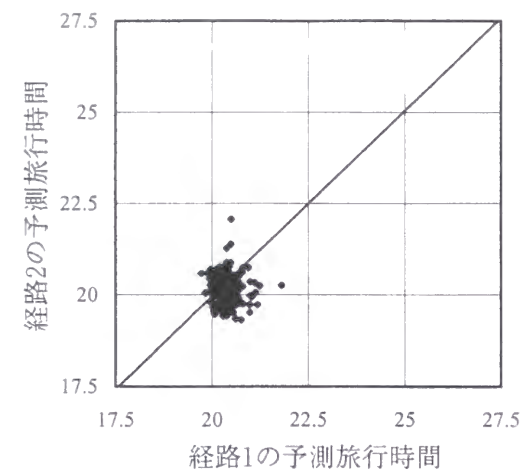


図 6.8.8 ケース 2 の 8 日目の散布図

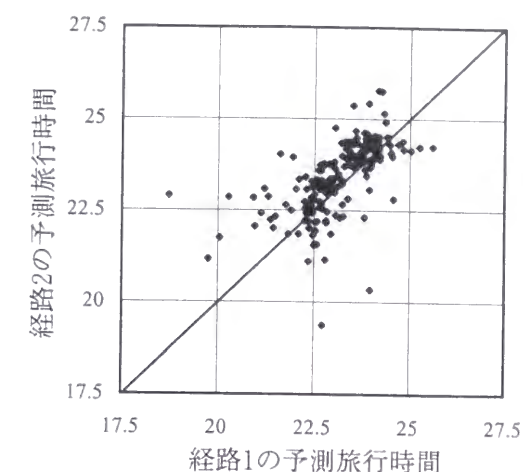


図 6.8.13 ケース 2 の 13 日目の散布図

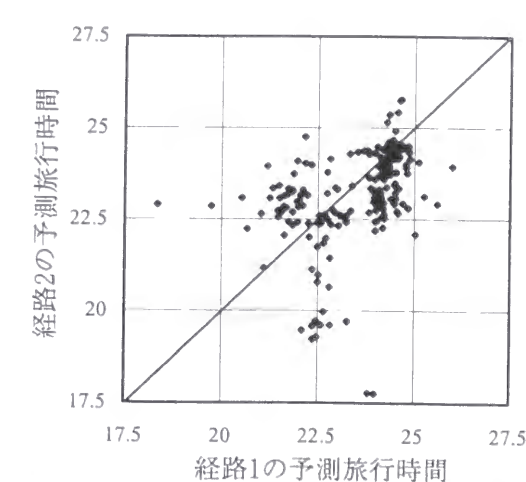


図 6.8.14 ケース 2 の 14 日目の散布図

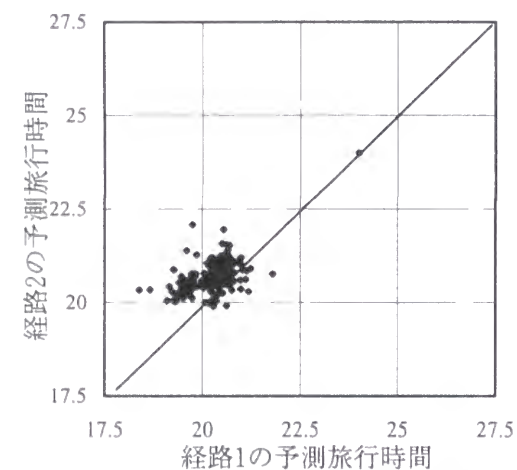


図 6.8.9 ケース 2 の 9 日目の散布図

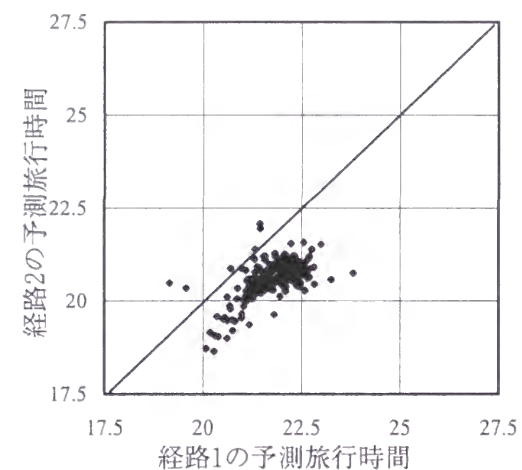


図 6.8.10 ケース 2 の 10 日目の散布図

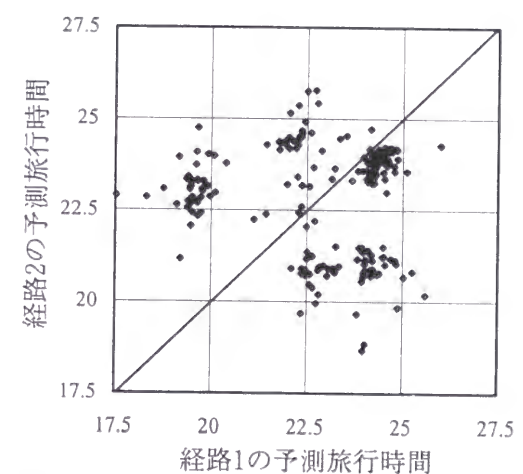


図 6.8.15 ケース 2 の 15 日目の散布図

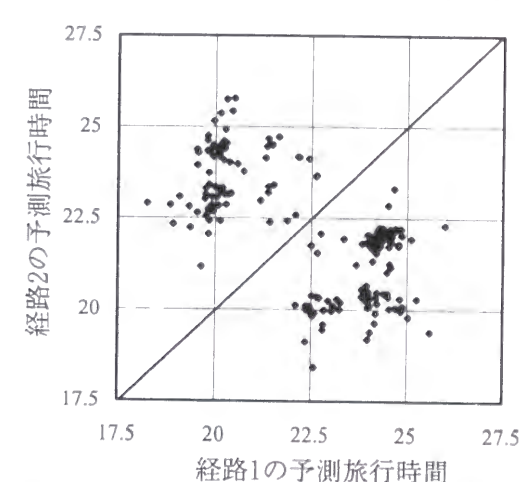


図 6.8.16 ケース 2 の 16 日目の散布図

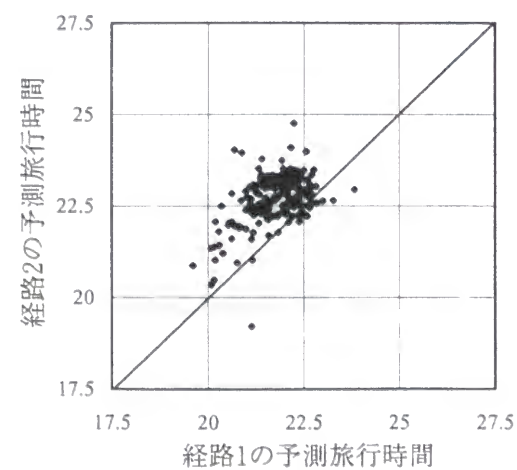


図 6.8.11 ケース 2 の 11 日目の散布図

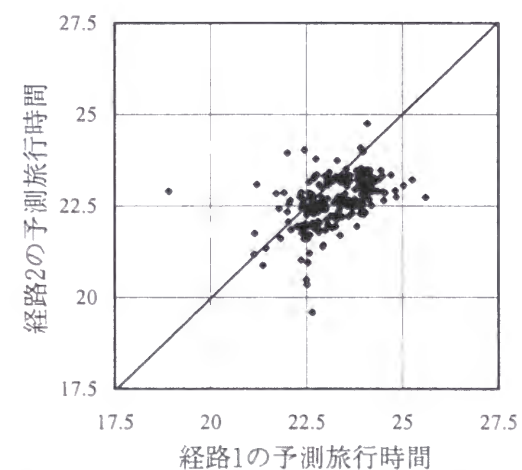


図 6.8.12 ケース 2 の 12 日目の散布図

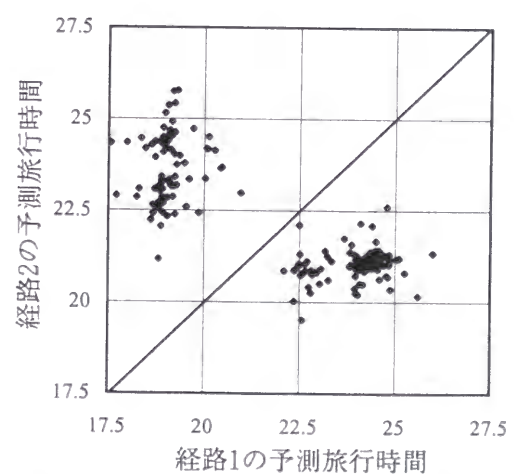


図 6.8.17 ケース 2 の 17 日目の散布図

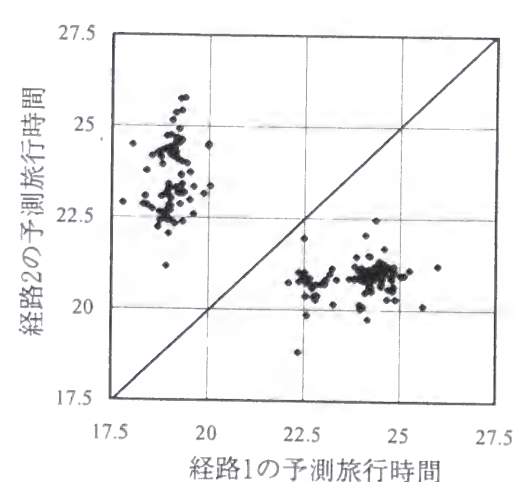


図 6.8.18 ケース 2 の 18 日目の散布図



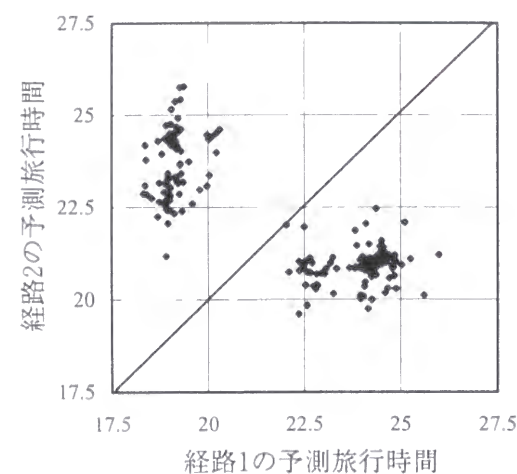


図 6.8.19 ケース 2 の 19 日目の散布図

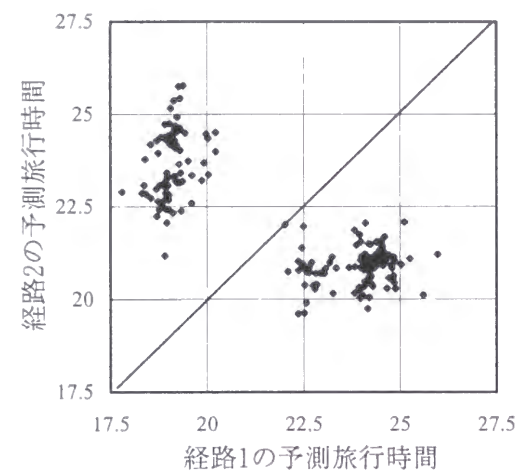


図 6.8.20 ケース 2 の 20 日目の散布図

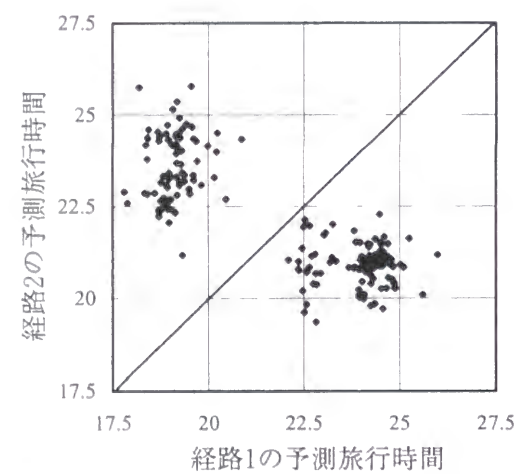


図 6.8.21 ケース 2 の 30 日目の散布図

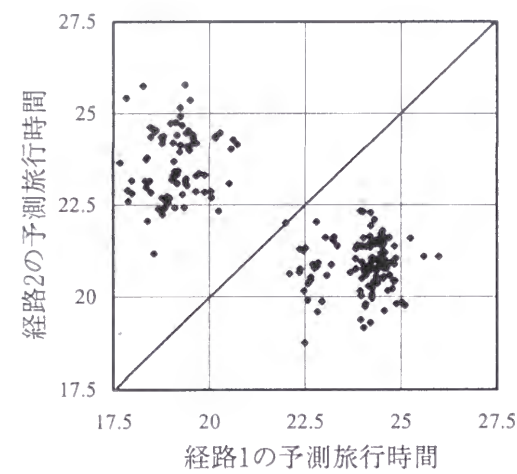


図 6.8.22 ケース 2 の 50 日目の散布図

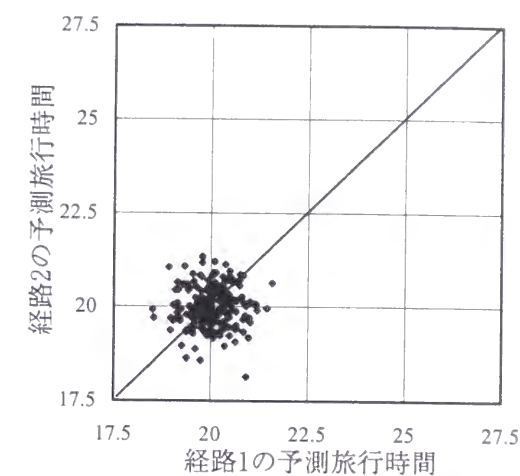


図 6.9.1 ケース 3 の 1 日目の散布図

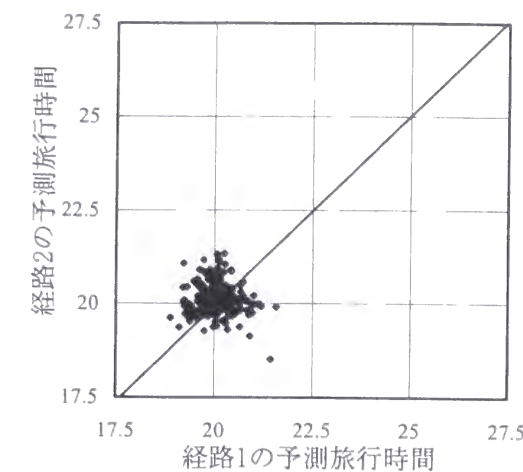


図 6.9.2 ケース 3 の 2 日目の散布図

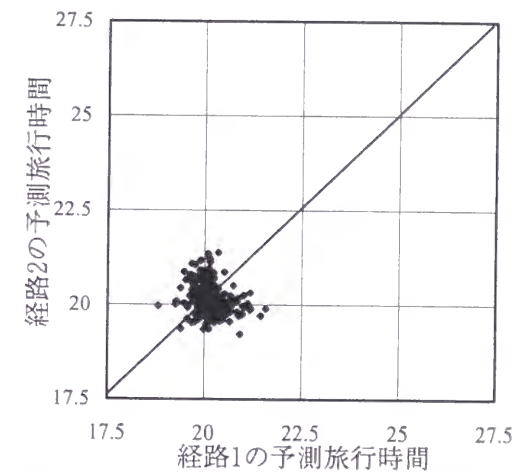


図 6.9.3 ケース 3 の 3 日目の散布図

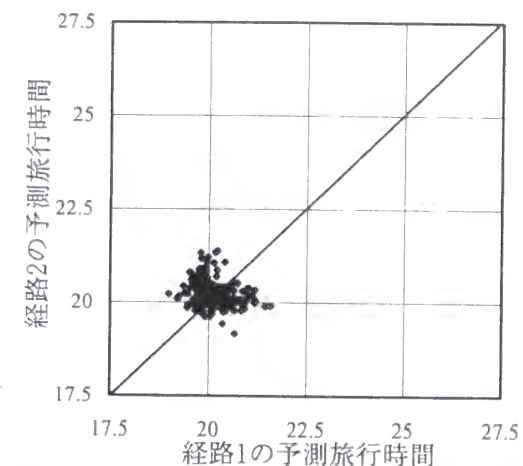


図 6.9.4 ケース 3 の 4 日目の散布図

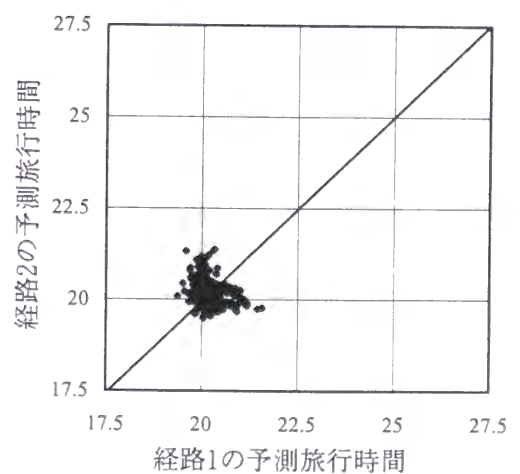


図 6.9.5 ケース 3 の 5 日目の散布図

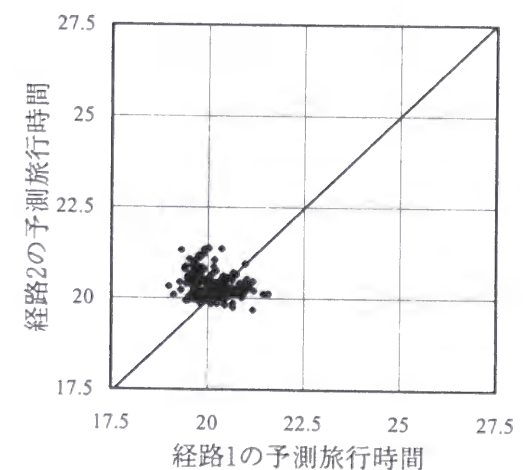


図 6.9.6 ケース 3 の 6 日目の散布図

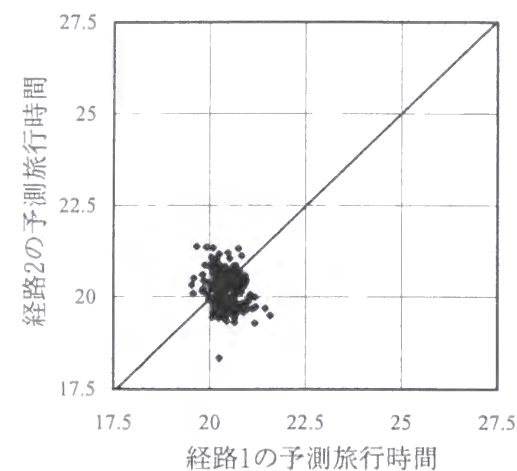


図 6.9.7 ケース 3 の 7 日目の散布図

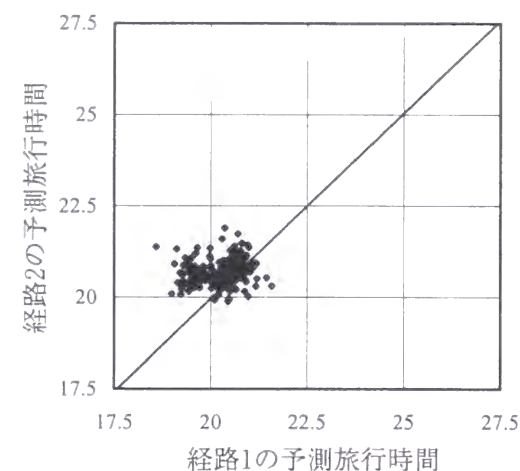


図 6.9.8 ケース 3 の 8 日目の散布図

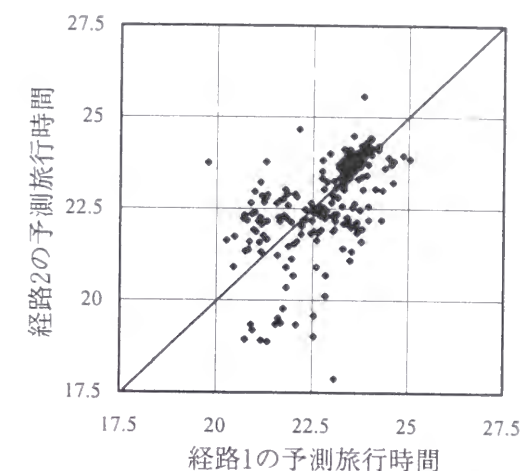


図 6.9.13 ケース 3 の 13 日目の散布図

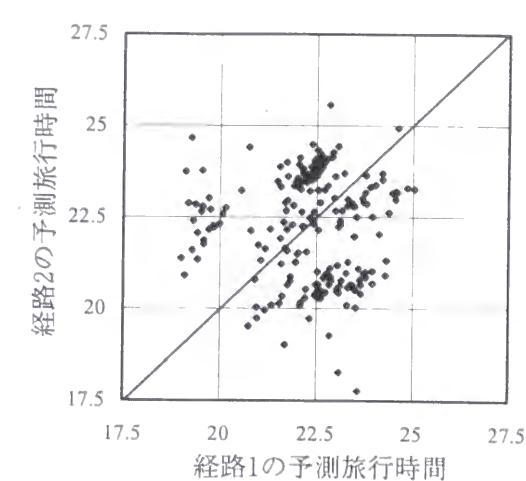


図 6.9.14 ケース 3 の 14 日目の散布図

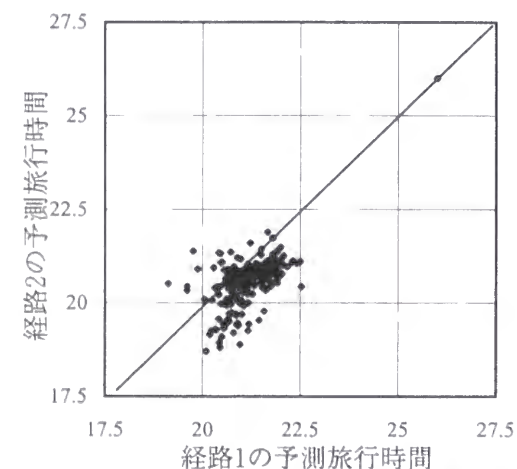


図 6.9.9 ケース 2 の 9 日目の散布図

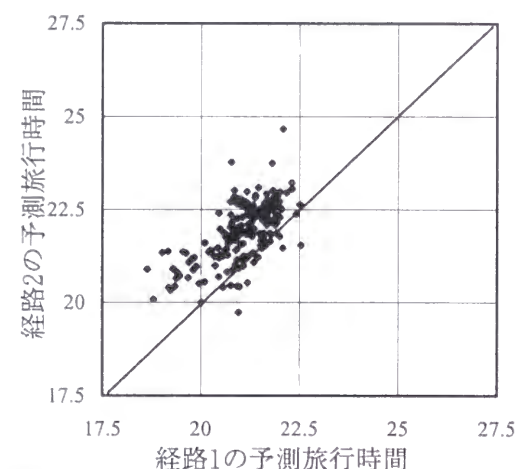


図 6.9.10 ケース 3 の 10 日目の散布図

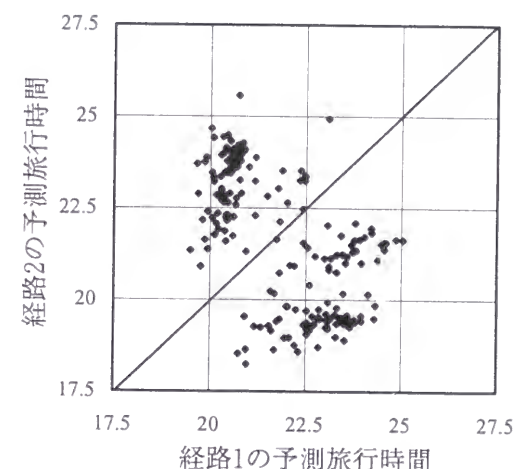


図 6.9.15 ケース 3 の 15 日目の散布図

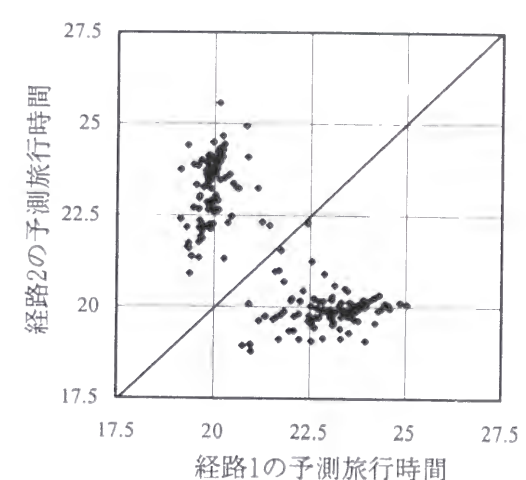


図 6.9.16 ケース 3 の 16 日目の散布図

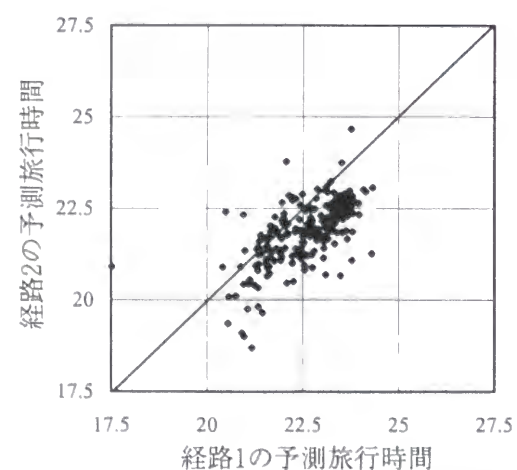


図 6.9.11 ケース 3 の 11 日目の散布図

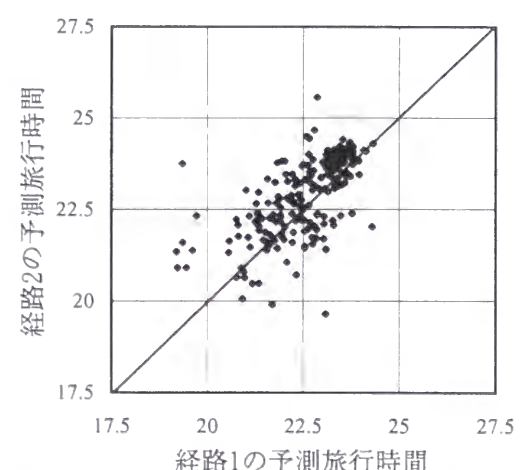


図 6.9.12 ケース 3 の 12 日目の散布図

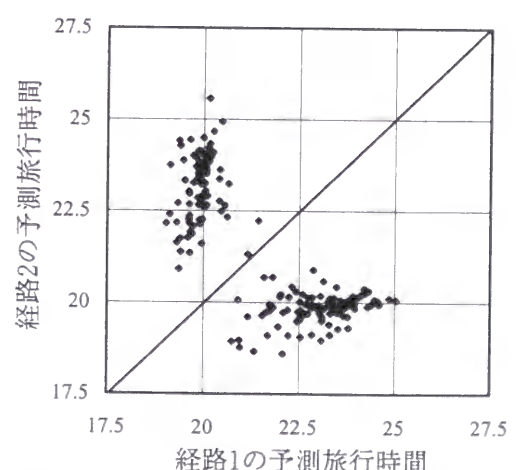


図 6.9.17 ケース 3 の 17 日目の散布図

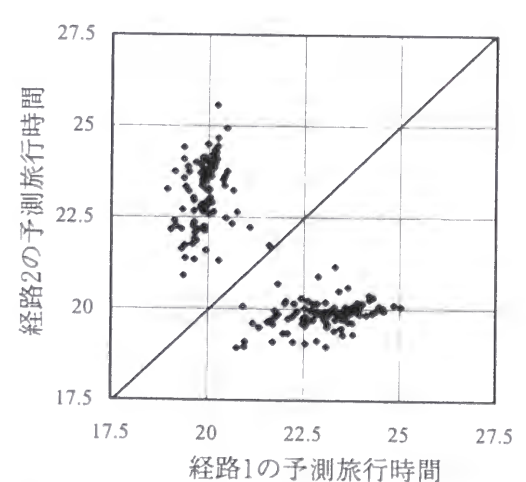


図 6.9.18 ケース 3 の 18 日目の散布図

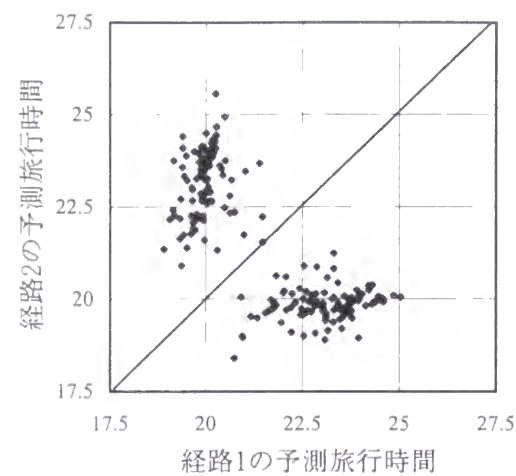


図 6.9.19 ケース 3 の 19 日目の散布図

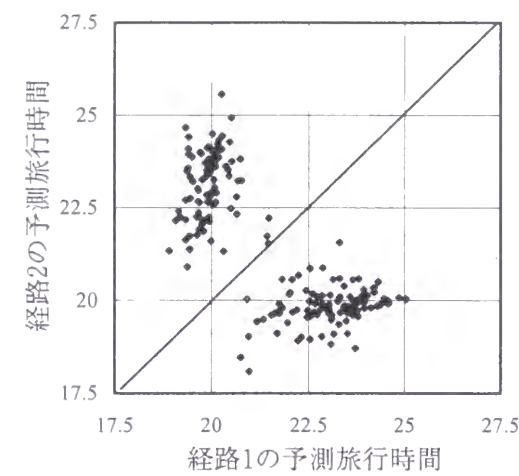


図 6.9.20 ケース 3 の 20 日目の散布図

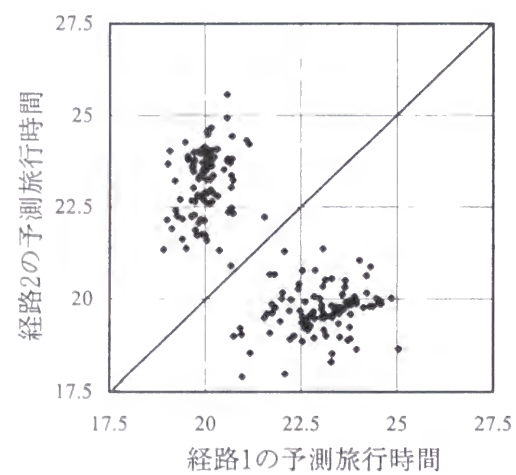


図 6.9.21 ケース 3 の 30 日目の散布図

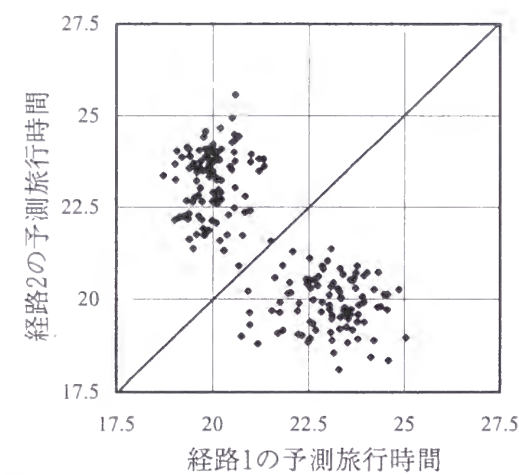


図 6.9.22 ケース 3 の 50 日目の散布図

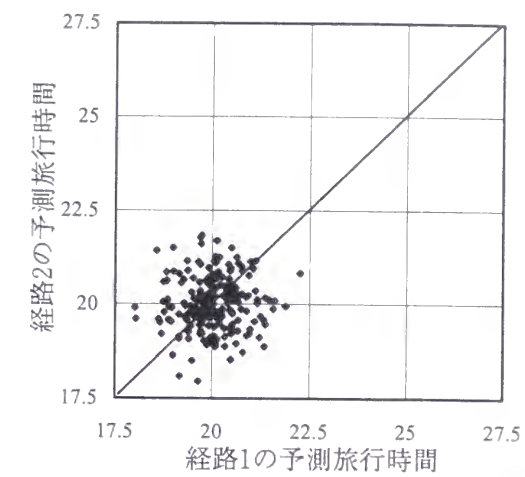


図 6.10.1 ケース 4 の 1 日目の散布図

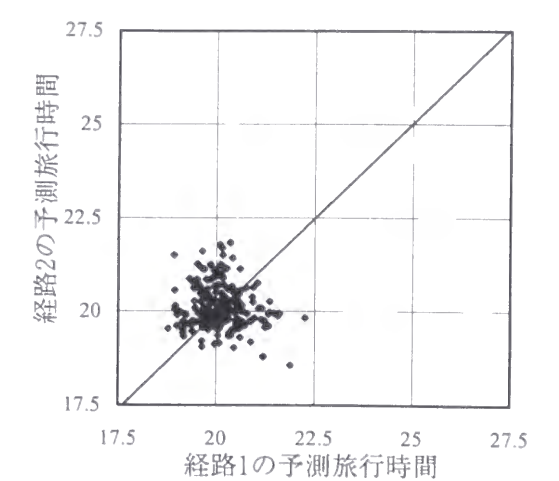


図 6.10.2 ケース 4 の 2 日目の散布図

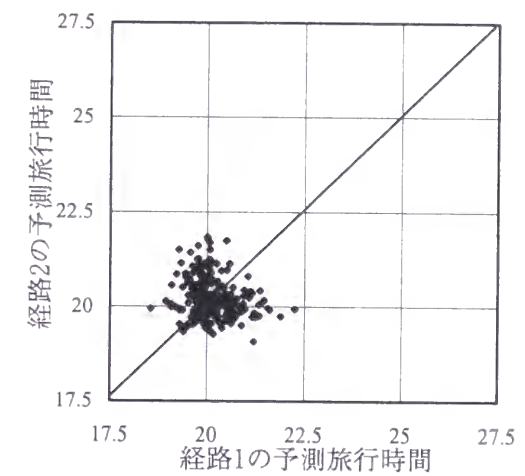


図 6.10.3 ケース 4 の 3 日目の散布図

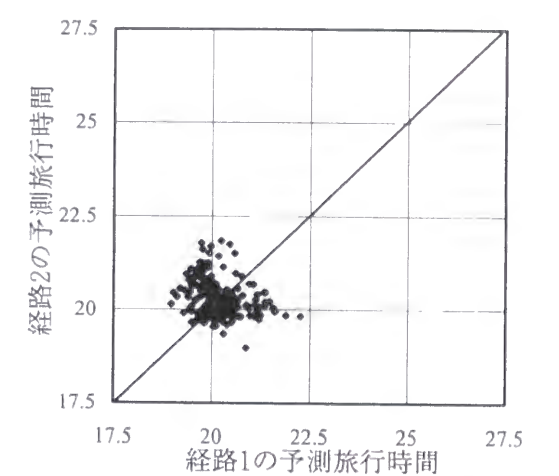


図 6.10.4 ケース 4 の 4 日目の散布図

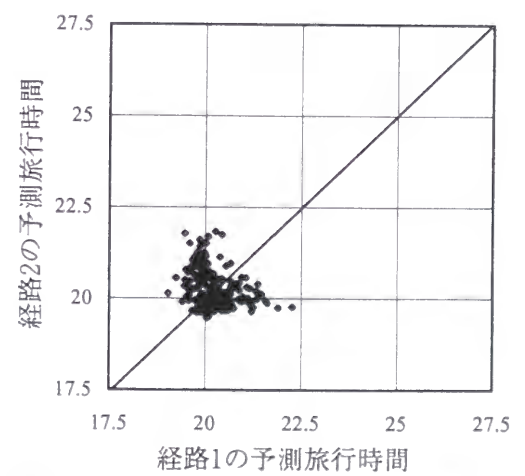


図 6.10.5 ケース 4 の 5 日目の散布図

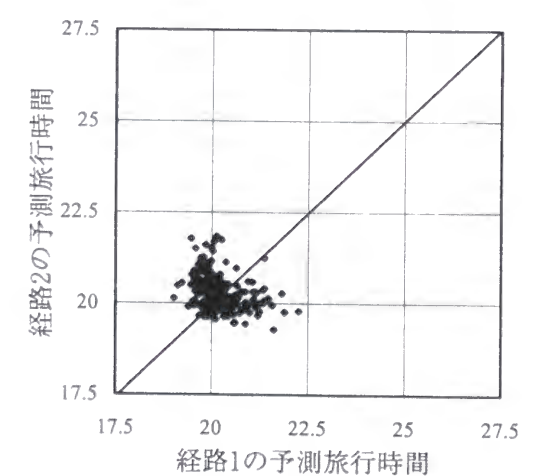


図 6.10.6 ケース 4 の 6 日目の散布図



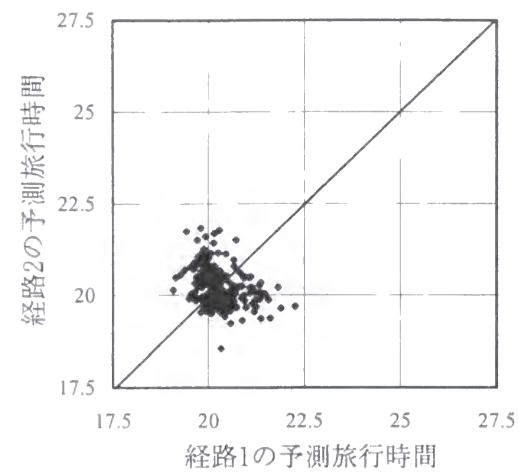


図 6.10.7 ケース 4 の 7 日目の散布図

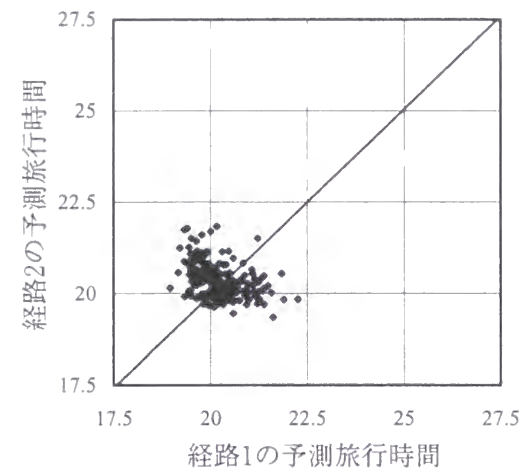


図 6.10.8 ケース 4 の 8 日目の散布図

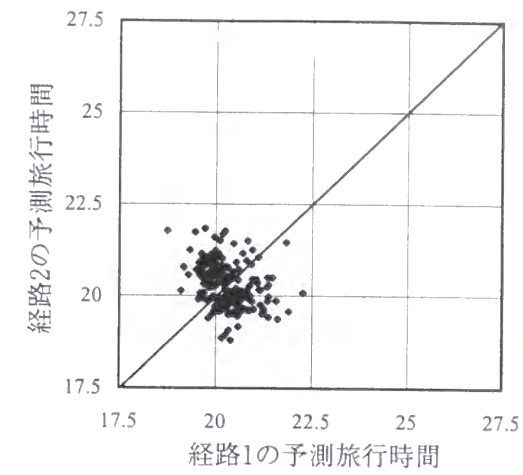


図 6.10.13 ケース 4 の 13 日目の散布図

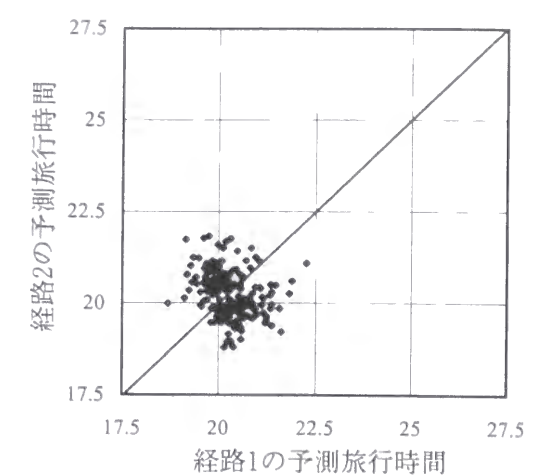


図 6.10.14 ケース 4 の 14 日目の散布図

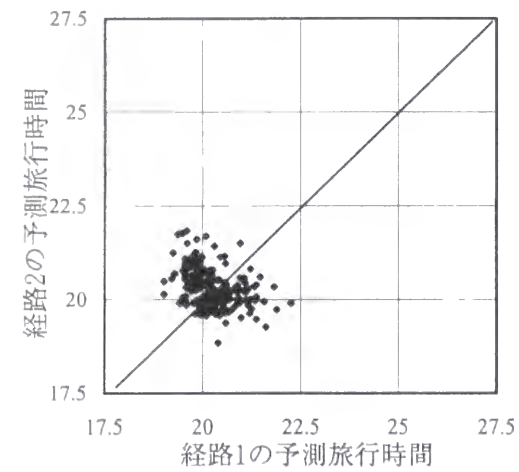


図 6.10.9 ケース 2 の 9 日目の散布図

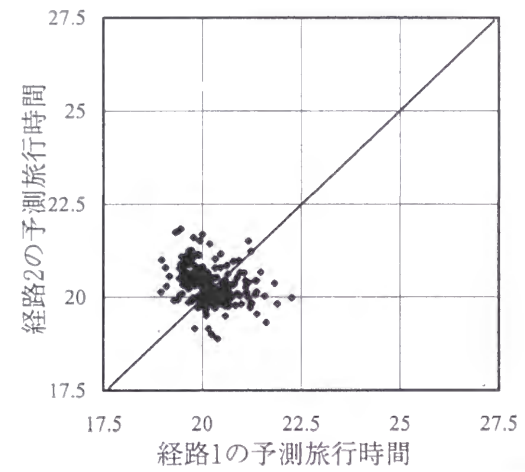


図 6.10.10 ケース 4 の 10 日目の散布図

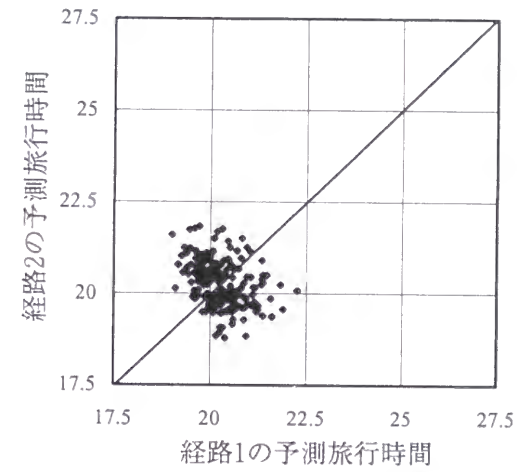


図 6.10.15 ケース 4 の 15 日目の散布図

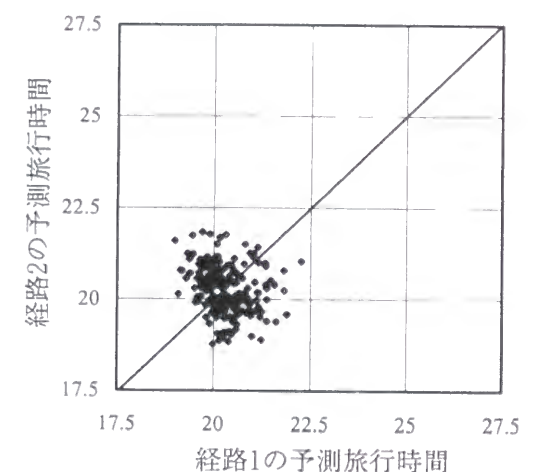


図 6.10.16 ケース 4 の 16 日目の散布図

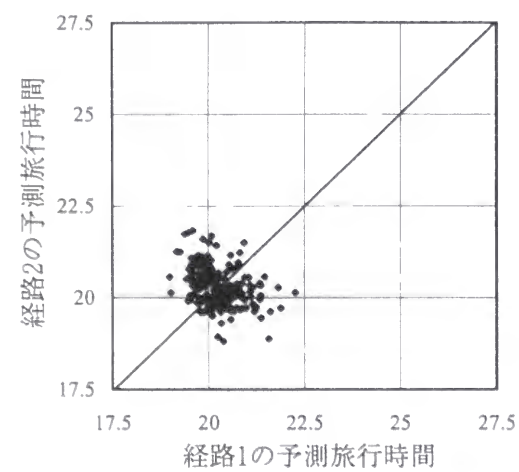


図 6.10.11 ケース 4 の 11 日目の散布図

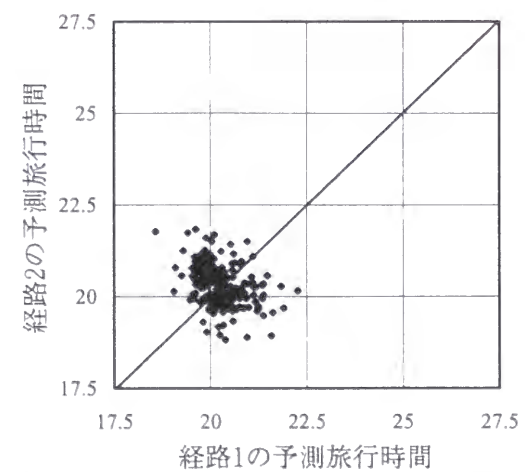


図 6.10.12 ケース 4 の 12 日目の散布図

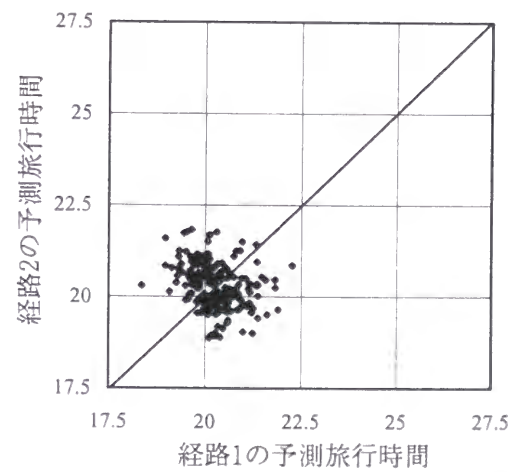


図 6.10.17 ケース 4 の 17 日目の散布図

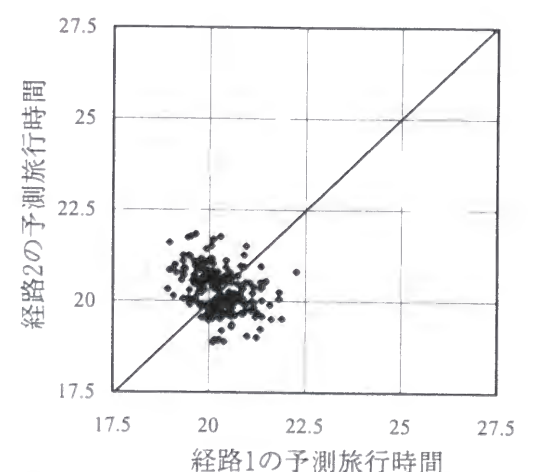


図 6.10.18 ケース 4 の 18 日目の散布図



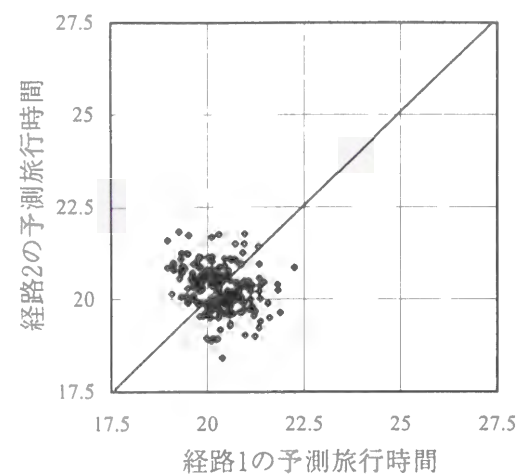


図 6.10.19 ケース 4 の 19 日目の散布図

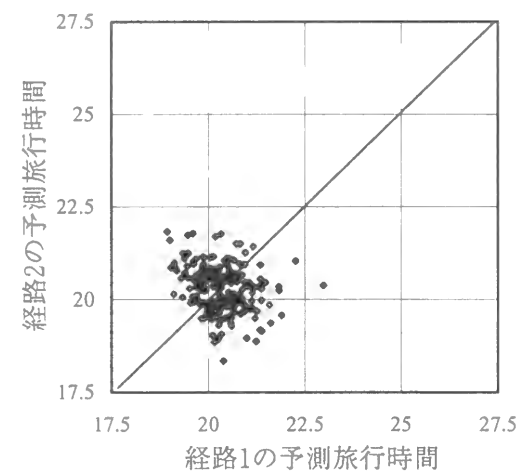


図 6.10.20 ケース 4 の 20 日目の散布図

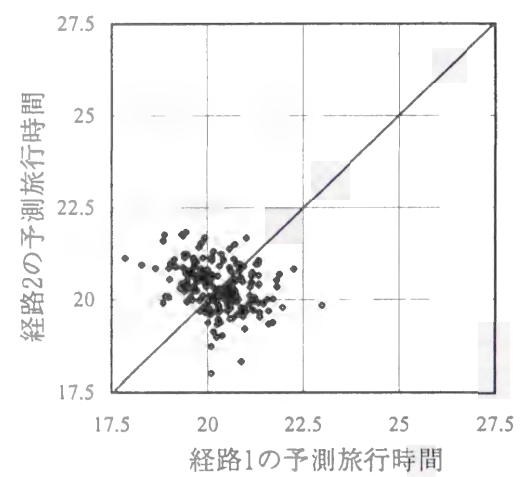


図 6.10.21 ケース 4 の 30 日目の散布図

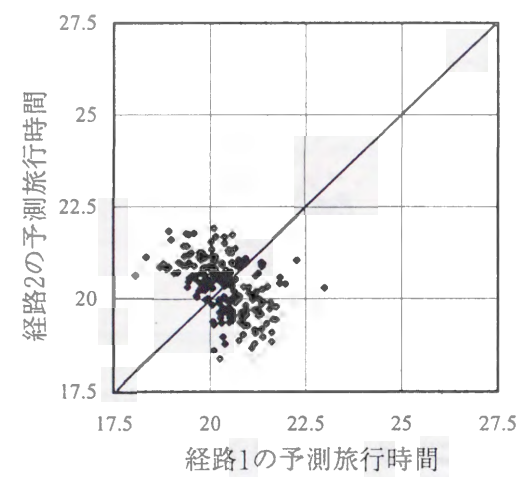


図 6.10.22 ケース 4 の 50 日目の散布図

注

- [1] 総交通量数が 200 台と少ないのは計算上の理由による。しかし、シミュレーションにおける総交通量の多少は、システムの挙動に対して本質的な影響を及ぼさないものと考えられる。
- [2] 数値実験では、両経路の属性は同じであるため、経路交通量が等しい場合（両経路とも交通量が 100）が利用者均衡となる。
- [3] 通常用いられるネットワーク均衡である Wardrop 均衡や確率的利用者均衡では、解の一意性が示されている（Sheffi, 1985）。一意性を持たないネットワーク均衡の概念としては、限定合理的利用者均衡（bounded rational user equilibrium）がある（Mahmassani, 1987）。

## 参考文献

- Arthur, B. W. (1988) Self-Reinforcing Mechanisms in Economics, *The Economy as an Evolving Complex System* edited by Anderson, P.W. et al., Addison Wesley, pp.9-31.
- Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual, Urban Planning Division, U. S. Department of Commerce, Washington D. C.
- 藤井聡, 中野雅也, 北村隆一, 杉山守久: 自動車通勤ドライバーの公共交通機関の思い込み認知とその改善についての実証的研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 4 部, pp.636-637, 1999.
- Goldberg, D. G. (1989) Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Holland, J. H. (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Horowitz, J.L. (1984) The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-Link Transportation Network, *Transportation Research*, vol.18B, pp.13-28.
- 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏 (1989) 経路選択行動の動態変化に関するシミュレーション分析, 土木計画学・講演集, No.12, pp.29-36.
- Mahmassani, H. S. (1987) On Bounded Rational User Equilibrium in Transportation Systems, *Transportation Science*, Vol.21, No.2, pp.89-99.
- Mednick, S. A., H. R. Pollio and E. F. Loftus 著, 八木晃訳, 学習, 岩波書店, 1980.
- Nakayama, S., R. Kitamura and S. Fujii (1999) Drivers' Learning and Network Behavior: A Dynamic Analysis of the Driver-Network System as a Complex System, *Transportation Research Record*, (forthcoming).
- 中山晶一郎, 藤井聡, 北村隆一 (1997) ドライバーの学習を考慮した道路交通システム解析, 第 17 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.73-76.
- 中山晶一郎, 藤井聡, 北村隆一 (1999) ドライバーの学習を考慮した道路交通の動的解析: 複雑系としての道路交通システム解析に向けて, 土木計画学論文集, No.16, pp.753-761.
- Sheffi, Y. (1985) Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

## 第 7 章 行動主体のヒューリスティクスと交通システムの挙動

### 7.1 不確実性下におけるヒューリスティクスと経路選択

前章では, 行動主体の経験の蓄積による学習を考慮した経路選択モデルを構築し, 交通システムや経路選択行動の挙動に関するシミュレーション分析を行った. その結果, 多くの行動主体が現状と著しく異なる認知状態である「思い込み」(delusion) 状態に陥ることによって, 「思い込み均衡」(deluded equilibrium) と呼ばれる均衡が形成され得ることが示された. 前章のモデルでは, 行動主体は予測旅行時間 (知覚旅行時間) の最も小さい経路を走行するとし, その予測旅行時間は過去に経験した旅行時間の重み付き平均として定式化され, その重みは遺伝的アルゴリズムによって変更されるものと仮定されていた.

前章でのモデルを含めこれまでの研究の多くは, 行動主体は予測旅行時間 (知覚旅行時間) もしくはその分布を形成し, それに基づいて経路を選択するというものである. しかし, 人間は不確実性下では, ヒューリスティクス (heuristics) を用いて意思決定を行っていることが知られている<sup>[1]</sup>. 日々の経路選択を行う場合, 人間が毎回, 認知負荷の大きい旅行時間の予測を行った上で経路を選択しているとは限らない. 例えば, 経路変更を全く行わず, 常に同じ経路を選択する人もいれば, ランダムに経路を選択する人もいるかもしれない. このように実際の経路選択は従来までの研究が仮定するよりももっと単純な過程により行われていると考えられる. もし実際の人間がヒューリスティクスを用いて経路を選択しているのにもかかわらず, 旅行時間に基づいた経路選択を仮定すれば, 経路選択行動の記述に対して系統的な誤差 (systematic bias) が生じたり, 交通システムのメカニズムを歪んで捉える可能性があると考えられる. したがって, 本章では, このようなヒューリスティクスを考慮した上で交通システムの挙動および経路選択行動に関して考察する.

### 7.2 シミュレーションモデルの概要

本章では, 図 7.1 に示すような交通システム・シミュレーションを構築する. シミュレーション・モデルは, 基本的には前章と同様に, 走行経験に基づき学習しつつ, 選択経路

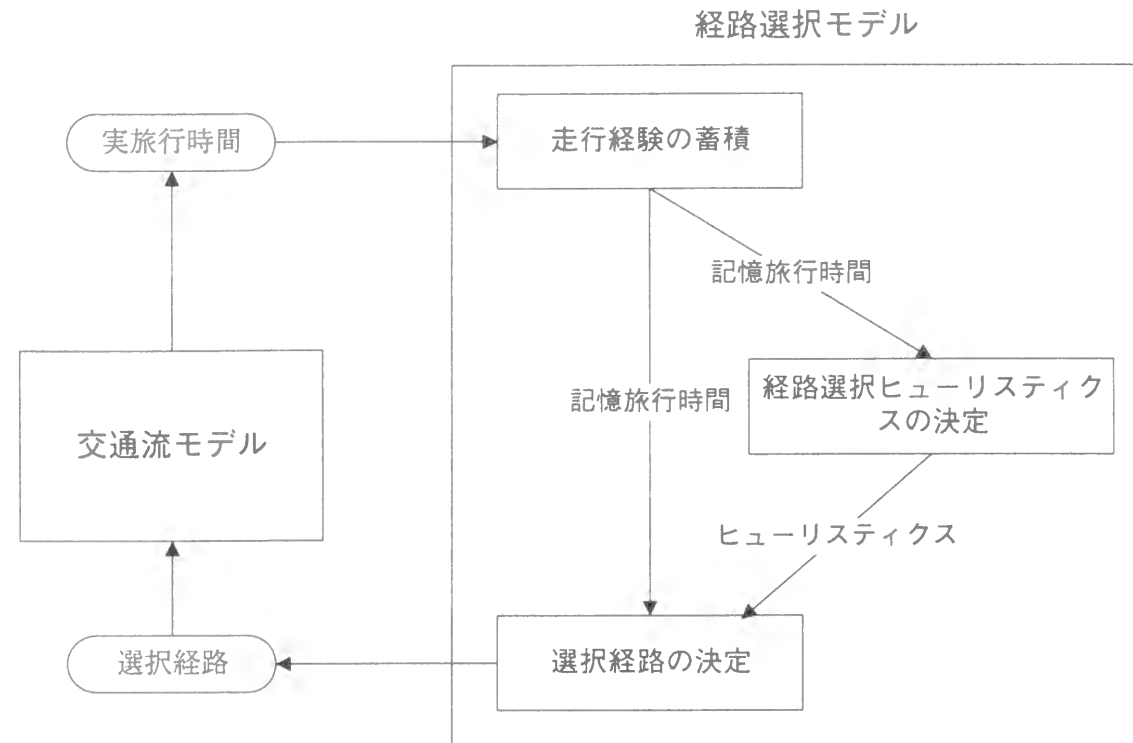


図 7.1 シミュレーションモデルの概要

を決定する経路選択モデルとそれを集計化して交通状況を再現する交通流モデルから構成される。

### 7.2.1 経路選択モデル

#### (1) 経路選択モデルの概要

本章ではヒューリスティクスを考慮した経路選択モデルを次のように構築する。各行動主体は、潜在的な複数の経路選択ヒューリスティクスを持ち、そのうちのある一つのヒューリスティクスを用いて経路を選択する。そして、それぞれの経路選択ヒューリスティクスごとに評価値を考え、各行動主体はその評価値が最も小さな経路選択ヒューリスティクスを採用しているとする。評価値は行動主体の経験によって変化するものであり、その変化による経路選択ヒューリスティクスの変遷は行動主体の学習過程を意味している。

経路選択ヒューリスティクスは、本来的には、実際の経路選択行動を観察することによって決定されるべきである。しかし、本章の目的は交通システムや経路選択行動の理解であり、定量的な予測ではないため、それほど精緻なヒューリスティクスを必要とはしていない。したがって、本章では潜在的な経路選択ヒューリスティクスを以下に示す3タイプ

に限定し、外生的に与えることとする。

#### (2) 経路選択ヒューリスティクス

本研究では、以下の3タイプの経路選択ヒューリスティクスを設定した。

- a) 経路固定ヒューリスティクス：経路変更せず、常に同一の経路を選択する。
- b) ランダムヒューリスティクス：全くランダムに経路選択を行う。
- c) 経験利用ヒューリスティクス：過去の経験を考慮する経路選択ヒューリスティクス。ここでは、以下の  $C_{ij}^*$  が最小の値となる経路を選択する。

$$C_{ij}^* = \{t_{ij}^{ave} + \gamma_i (t_{ij}^{max} - t_{ij}^{min})\} \quad (7.1)$$

$k$  : 経路選択ヒューリスティクス番号 (経験利用ヒューリスティクスにも複数考えられるため、ヒューリスティクス番号用いて表記する)

$t_{ij}^{ave}$  :  $(i-1)$  日から過去  $l$  回分の経路  $j$  の走行経験の平均旅行時間 ( $0 \leq l \leq m$ )

$t_{ij}^{max}$  :  $(i-1)$  日から過去  $m$  回分の経路  $j$  での走行経験のうち、最も大きな旅行時間。

$t_{ij}^{min}$  :  $(i-1)$  日から過去  $m$  回分の経路  $j$  での走行経験のうち、最も小さな旅行時間。

$\gamma_i$  :  $i$  日目における経路選択ヒューリスティクス  $k$  の不確実性への態度を表わすパラメータ。

ここで、経路固定タイプのヒューリスティクスは起終点間の経路数だけ存在し、また、経験利用タイプのルールはある一定数あるものとする。

#### (3) 経路選択ヒューリスティクスの変遷

行動主体が取得することの出来る情報は限られているため、ランダムに経路を決定することが良いのか、あるいは経験を無視してずっとある経路を使い続けるのが良いのかを判断すること、すなわち、いずれの経路選択ヒューリスティクスが優れているのか、を客観的に判断することはできない。したがって、行動主体はある経路選択ヒューリスティクスを用いた結果、選択経路の旅行時間が小さければそのヒューリスティクスは優れたヒューリスティクスであるとして、ヒューリスティクスの優劣の判断をせざるを得ない。そこで、

本研究では、行動主体は、その経路選択ヒューリスティクスをもし利用していたのなら、目的地に、いつもよりも早くたどり着けたのだろうか、と考え、ルールの優劣の判断を行っているものとして、ヒューリスティクスの評価値を定式化することとした。なお、行動主体は自分が走行した経路の旅行時間のみしか知ることには出来ないため、このような判断が行えるのは、その当日に利用した経路とその経路選択ヒューリスティクスから決定された経路とが一致する場合のみである。以上より、以下のように  $i$  日目における経路選択ヒューリスティクス  $k$  のヒューリスティクス評価値  $f_i^k$  を定式化することとした。なお、既に述べたように、 $(i - 1)$  日目に利用していた経路とヒューリスティクス  $k$  が推奨する経路とが一致する場合のみ評価値を更新し、異なる場合には、評価値は変更しない。

$$f_i^k = (1 - c) \cdot f_{i-1}^k + c \cdot t_{i-1}$$

(7.2)

$f_i^k$  : 経路選択ヒューリスティクス  $k$  の評価値

$t_{i-1}$  :  $(i-1)$  日目 (前日) の走行した経路の旅行時間

$c$  : パラメータ ( $0 \leq c \leq 1$ )

ここで、 $c$  は、ヒューリスティクスの評価値に、過去の経験をどれほどを反映させるのかを意味するものであり、1.0 に近い程、過去の経験の影響が大きい。逆に、 $c$  が 0.0 に近い程、新しい経験によって更新されやすく、過去の経験の影響が小さくなる。

経験利用ヒューリスティクスに関しては、そのヒューリスティクスの特質を規定するパラメータ  $\gamma_i$  と  $l$  を、前章で述べた遺伝的アルゴリズムの考え方に基づいて以下のように変化させるようにした。最も評価値の大きい (最も劣った) ヒューリスティクスを削除し、ランダムに作成したヒューリスティクス、つまり、 $\gamma, l$  のそれぞれのパラメータをランダムな値としたヒューリスティクスを加える。このような過程を通じて、優れた経験利用ヒューリスティクスが生き残ると考えられる。

(4) 選択経路の算出

行動主体が選択する経路は、基本的に経路選択ヒューリスティクスの評価値  $f_i^k$  が最小となる経路選択ヒューリスティクスに従って算出した経路を選択するものとする。

$$Hueristics = \arg \min_k f_i^k$$

(7.3)

$Heuristics$  : 行動主体が用いる経路選択ヒューリスティクス

$\arg$  :  $f_i^k$  が最小となる  $k$  をとる。

7.2.2 交通流モデル

本章でも、第 6 章と同様な BPR 関数 (6.2.2 交通流モデル 参照) によって、交通量  $q$  と旅行時間  $t$  の関係を表わすこととする。

7.3 数値実験

上述のシミュレーションモデルを用いて、1 ペアの起終点 (OD) が 2 経路 (経路 1 と経路 2) によって結ばれるネットワークに、200 人の行動主体を繰り返し走行させる数値実験を行った。数値実験に用いたパラメータは表 7.1 の通りである。

本章では、ヒューリスティクスの評価値の更新に関するパラメータ  $c$  が 0.99, 0.95, 0.9, 0.5 である 4 種類、ネットワークに関しては、互いに異質な経路の場合 (ケース a) と同質な経路の場合 (ケース b) の合計 8 ケースについて掲載する (表 7.2 参照)。

図 7.2.1 は、異質経路で、 $c = 0.99$  の場合 (ケース 1a) の両経路の旅行時間の推移を示している。図 7.2.2 はこのケースの各経路選択ヒューリスティクスタイプの交通量である。図 7.2.3 は両経路の 20 日間の旅行時間の平均の推移である<sup>[2]</sup> (図 7.2.1 から図 7.2.3 は章末に掲載)。図 7.3.1 から図 7.3.3 は  $c = 0.95$  であるケース 2a の場合、図 7.4.1 から図 7.4.3 は

表 7.1 数値実験におけるパラメータ

行動モデル		
ヒューリスティクス数	経路固定	2
	ランダム	1
	経験利用	5
記憶最大数 $m$		10

交通流モデル				
パラメータ $\alpha$	2.0			
パラメータ $\beta$	2.0			
	異質経路 (ケースa)		同質経路 (ケースb)	
	経路1	経路2	経路1	経路2
交通容量 $C$	200	100	200	200
自由走行時間 $t_f$	20	10	20	20



表 7.2 数値実験のケース

	評価値更新のパラメータ $c$			
	0.99	0.95	0.90	0.50
異質経路	ケース 1a	ケース 2a	ケース 3a	ケース 4a
同質経路	ケース 1b	ケース 2b	ケース 3b	ケース 4b

$c = 0.9$  であるケース 3a の場合、図 7.5.1 から図 7.5.3 は  $c = 0.5$  であるケース 4a の場合の両経路の旅行時間の推移、各経路選択ヒューリスティクスのタイプの交通量、両経路の 20 日間の旅行時間の平均の推移である。また、図 7.6.1 から図 7.6.3、図 7.7.1 から図 7.7.3、図 7.8.1 から図 7.8.3、図 7.9.1 から図 7.9.3 は、同質経路の場合の各ケース（ケース 1b、ケース 2b、ケース 3b、ケース 4b）の旅行時間の推移、各経路選択ヒューリスティクスのタイプの人交通量、20 日間の旅行時間平均の推移である（図 7.2.1 から図 7.9.3 は章末に掲載）。

図 7.2.1、図 7.3.1、図 7.4.1、図 7.5.1、また、図 7.6.1、図 7.7.1、図 7.8.1、図 7.9.1 および各ケースの 201 日から 400 日までの両経路の経時的平均と経時的分散を記載した表 7.3 から、ヒューリスティクスの評価値の更新に関するパラメータ  $c$  が小さいほど旅行時間の変動が大きくなっていることが分かる。また、異質経路の場合、表 7.3 および図 7.2.3、図 7.3.3、図 7.4.3、図 7.5.3 から、 $c$  が大きくなるほど、平均旅行時間の差が大きくなり、各ケースとも経路 1 の旅行時間のほうが経路 2 よりも大きいことが分かる。201 日から 400 日の両経路の旅行時間の経時的平均の差に関する  $t$  検定の結果は表 7.4 の通りである。これらの  $t$  検定の結果から、異質な経路（ケース a）では、 $c = 0.99$  と  $c = 0.95$  判断しにくい部分があるものの、経路間の旅行時間の平均は異なると言えそうである。一方、同質経路の場合は、経路間の旅行時間の違いは統計学的には認められなかった（表 7.4 参照）。経路 1 は、交通容量は大きい、遠回りとなる経路であり、経路 2 は交通容量は小さく、すぐに渋滞となるものの、距離が短い経路である。したがって、交通量の変動量が経路間

表 7.3 各ケースの経時的平均と経時的分散

	異質経路 (ケースa)				同質経路 (ケースb)			
	経路1		経路2		経路1		経路2	
	平均	分散	平均	分散	平均	分散	平均	分散
ケース 1	30.11	0.80	29.86	3.17	30.04	0.76	30.00	0.78
ケース 2	30.30	3.26	29.74	13.46	30.08	3.31	30.08	3.32
ケース 3	30.43	4.50	29.64	20.00	30.16	5.18	30.10	5.08
ケース 4	31.19	16.87	29.13	51.22	30.38	15.19	30.37	15.37

で同じであっても、経路 2 は渋滞した場合には旅行時間が著しく大きくなるために、旅行時間の平均値は経路間で異なったものとなる。したがって、旅行時間の変動、つまり、旅行時間に対する不確実性が大きいと、経路 2 の走行を控える人が増加することになる。異質経路間では、経路 1 の方が交通量が多くなるのは以上のような理由による。

図 7.3.2（ケース 2a）では、およそ 80 日目までは経験利用タイプの人全体の 6~7 割を占めているが、その後経験利用タイプの人数（交通量）は減少し、どのタイプの人数もほぼ同じ割合となる状態に落ち着く。図 7.3.1 から、前者の状態では旅行時間の変動は比較的小さく、後者の場合は旅行時間の変動は大きいことが分かる。このようにシステムは、経験利用タイプが過半数を占める比較的安定した状態と各タイプがおおよそではあるが同じ割合だけ存在して前者に比べて比較的不安定な状態の二種類の状態に分類することができる。ケース 3a、ケース 4a も同様な二種類の状態が存在し、ケース 3a では初期の約 40 日間、ケース 4a では初期の約 10 日間が経験利用タイプが過半数を占めている前者の状態である。また、ケース 1a の場合は、400 日間全てが前者の状態のみである。また、図 7.6.2、図 7.7.2、図 7.9.2 から、ケース 1b、ケース 2b、ケース 4b も同様の傾向が見られる。ただし、ケース 3b とケース 3a との間には若干の差違が見られる。

経験利用タイプが過半数を占めている状態では、行動主体は前章で述べた「思い込み」(delusion) を起こしている。ここで、彼らが「思い込み」状態であるのかを検討するために、彼らが採用した経路選択ヒューリスティクス  $k'$  の  $C_{ij}^*$  の値を調べる。 $C_{ij}^*$  の値は、式 (7.1) から分かるように単なる知覚旅行時間もしくは予測旅行時間というより、経路の不確実性への態度等も考慮した経路の評価値である。ケース 3a の 40 日目、80 日目、120 日目と 200 日目の  $C_{ij}^*$  の散布図がそれぞれ、図 7.10.1、図 7.10.2、図 7.10.3、図 7.10.4 である。散布図における一つのプロットはある行動主体のその日の経路評価値を表わし、図の横軸は経路 1 に対する評価値、縦軸は経路 2 に対する評価値を表わしている。旅行時間の平均は経路ごとにほぼ等しいので、プロットは対角線付近に存在するはずである（行動

表 7.4 経路間の平均および分散に関する検定

	異質経路 (ケースa)		同質経路 (ケースb)	
	平均 ( $t$ 検定)	分散 ( $F$ 検定)	平均 ( $t$ 検定)	分散 ( $F$ 検定)
ケース 1	1.80	0.25 (0.79)	0.36	0.97 (0.79)
ケース 2	1.92	0.24 (0.79)	0.49	1.00 (1.26)
ケース 3	2.25	0.26 (0.79)	0.36	1.02 (1.26)
ケース 4	3.53	0.33 (0.79)	1.65	0.99 (0.79)

括弧内は自由度 199 の F 分布の 5% 値

主体によって不確実性への態度  $\gamma$  が異なるため、行動主体が「正しく」認知していれば、プロットが対角線上のどの位置にあるのかは行動主体によって異なる。図 7.10.1 では、A や B に位置するような対角線から大きく離れたところに多少のプロットが集中している。これらは、客観的な状況と認知状況が大きく異なるという「思い込み」を起こした行動主体のプロットである。時間の経過とともに、対角線付近のプロットが多くなり、図 7.10.4 が示すように 200 日目には過半数のプロットが対角線上に存在する。

以上より、前述の経験利用タイプが過半数を占める状態では、行動主体のうち多くが「思い込み」を起こし、過半数の人が経路を変更しないため、システムは比較的安定した状態となっている。一方、ランダムタイプが若干ながらも優越するような状態では、行動主体の過半数が「思い込み」を起こしている状態に比べて比較的多くの行動主体がランダムに経路を選択するため、システムは不安定になっている。

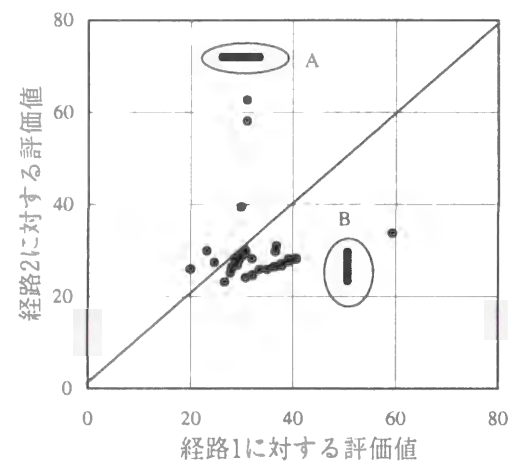


図 7.10.1 40日の  $C_{ij}^k$  の散布図（ケース3a）

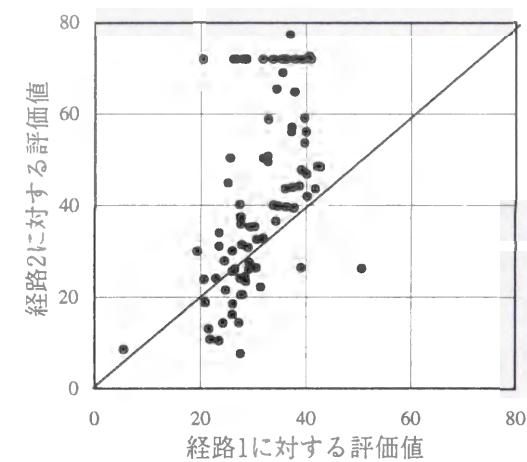


図 7.10.2 80日の  $C_{ij}^k$  の散布図（ケース3a）

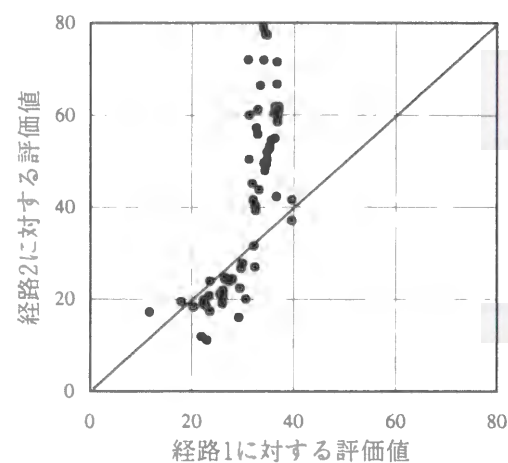


図 7.10.2 120日の  $C_{ij}^k$  の散布図（ケース3a）

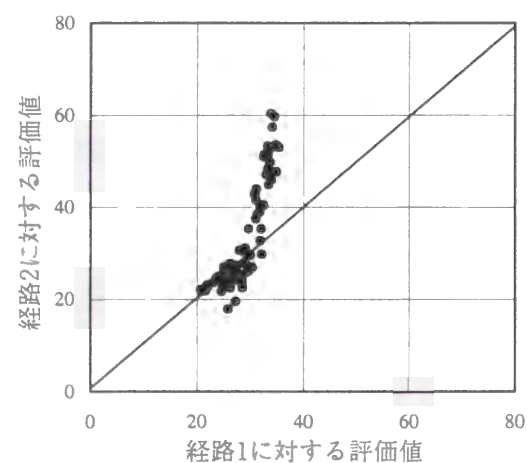


図 7.10.4 200日の  $C_{ij}^k$  の散布図（ケース3a）

## 7.4 結果の考察

### 7.4.1 利用者均衡の成立の有無

上述の数値実験の設定での利用者均衡は、各経路が 30 分となる場合である。各ケースにおいて経路 1 および経路 2 の 201 日から 400 日までの旅行時間の経時的平均が 30.0 と一致するのか、に関する  $\chi^2$  検定を行った結果が表 7.5 である。表 7.5 から、異質経路の場合の経路 1 の旅行時間の経時的平均は 30.0（利用者均衡の場合の旅行時間）とは統計学的には異なる一方、同質経路の場合は異なることはないことが分かった。これは、異質経路では経路 1 の旅行時間が 30.0 と異なったのは旅行時間関数（BPR 関数）が下に凸な関数であるとともに、旅行時間が変動していたためであると考えられる。

以上より、本数値実験から得られた結果からは、統計学的には利用者均衡（Wardrop 均衡）が必ずしも成立するとは限らないことを示唆している。また、表 7.4 から分かるように性質の異なる経路間では等時間原則が成立しないことが分かった。これは、旅行時間の不確実性と経路の異質性によるものである。

### 7.4.2 交通システムの時間的不可逆性

前節で述べたように交通システムの状態は、「思いこみ」を起こした行動主体が過半数を占める安定的な状態とランダムに経路を選択する行動主体が比較的多い不安定な状態に分けることが可能である。前者の状態の「思いこみ」認知を起こしている行動主体は、前章で述べたように、初期の旅行時間の大きな変動を経験し、ある一方の経路の旅行時間を極端に長いと思い込んでいる。このような行動主体はその経路を走行することではなく、少数の極端な経験のみが記憶され続ける。したがって、その経路の現状を知ることはない。しかし、たまたまその経路を走行することがあるならば、その経路に対する自らの認知が

表 7.5 経時的平均が利用者均衡と一致することに関する  $t$  検定

	ケース1a	ケース2a	ケース3a	ケース4a	ケース1b	ケース2b	ケース3b	ケース4b
経路 1	1.75 *	2.32 *	2.75 **	4.11 **	0.57	0.62	0.97	1.39
経路 2	-1.13	-1.00	-1.15	-1.72	0.05	0.65	0.61	1.33

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$

誤っていたことを知り、認知状態を「正す」ことが出来る。一度、思い込み認知が正されれば、システムにおいて極端な状態が続かない限り、再び思い込み認知に戻ることはない。同様に、このような行動主体から構成される交通システムにおいては、「思い込み」認知の行動主体による安定的な状態は一度それが崩れると、元に戻ることはない。以上のようにシミュレーションで得られた交通システムは時間的に不可逆な構造となっている。このような性質を持つシステムでは、システムの状態がどのようなものかを知るためには、いちいち時間を追ってシステムの状態を記述することが必要である可能性があり、均衡分析での交通システムのように時間が全く捨象されて単純なシステムとは全く異なるシステムである。このような性質が交通システムに存在することは、均衡という「状態」としてそれを記述することが必ずしも適切ではないことを示唆するものと考えられる。したがって、均衡分析だけでは交通システムの全てを理解することは出来ず、それとは異なった視点から交通システムを捉えることが必要であると考えられる。

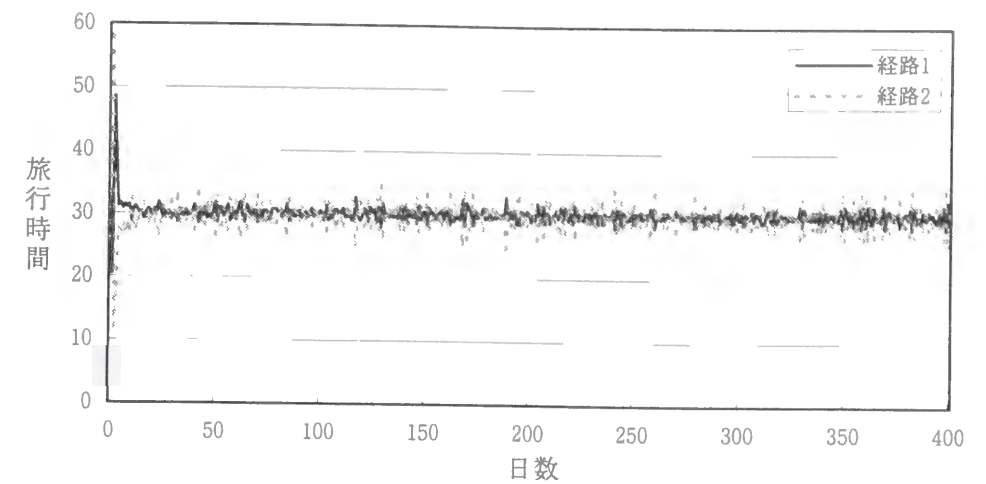


図 7.2.1 両経路の旅行時間 (ケース1a,  $c = 0.99$ )

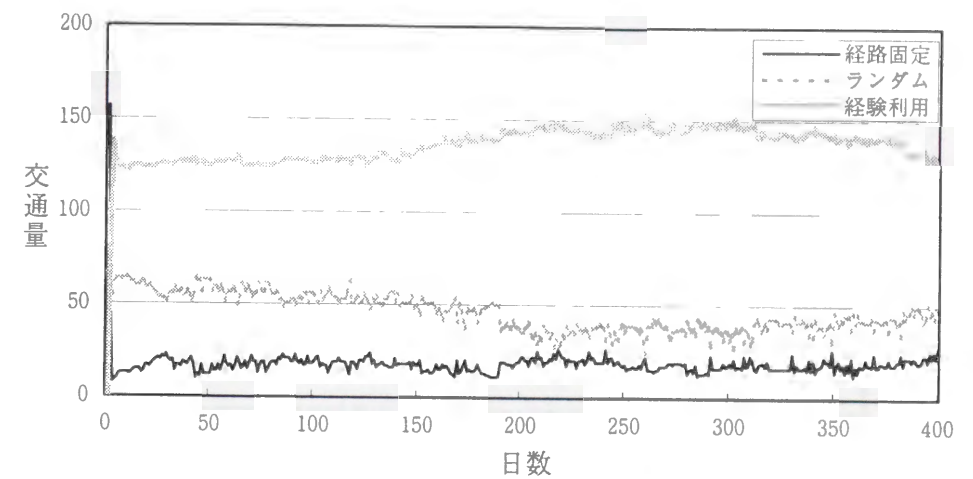


図 7.2.2 各ヒューリスティクスタイプの交通量 (ケース1a  $c = 0.99$ )

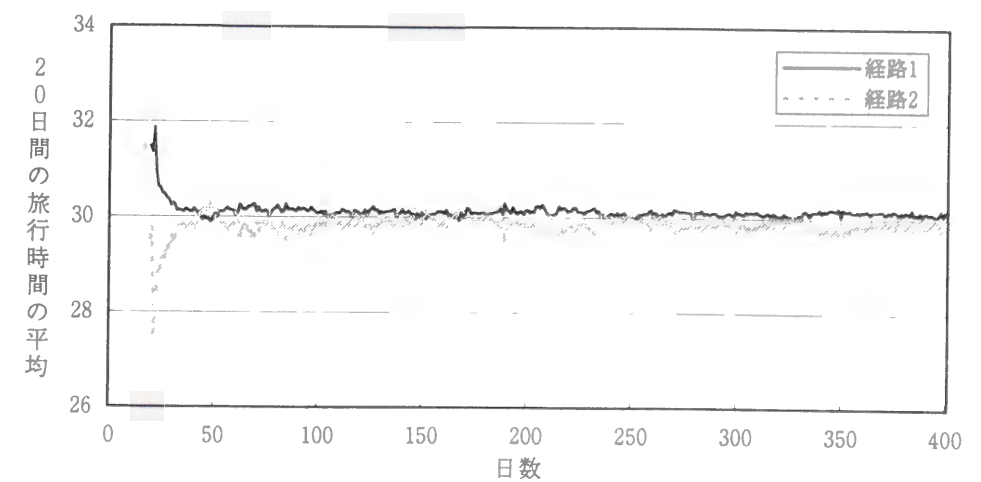


図 7.2.3 両経路の20日間の旅行時間の平均 (ケース1a,  $c = 0.99$ )



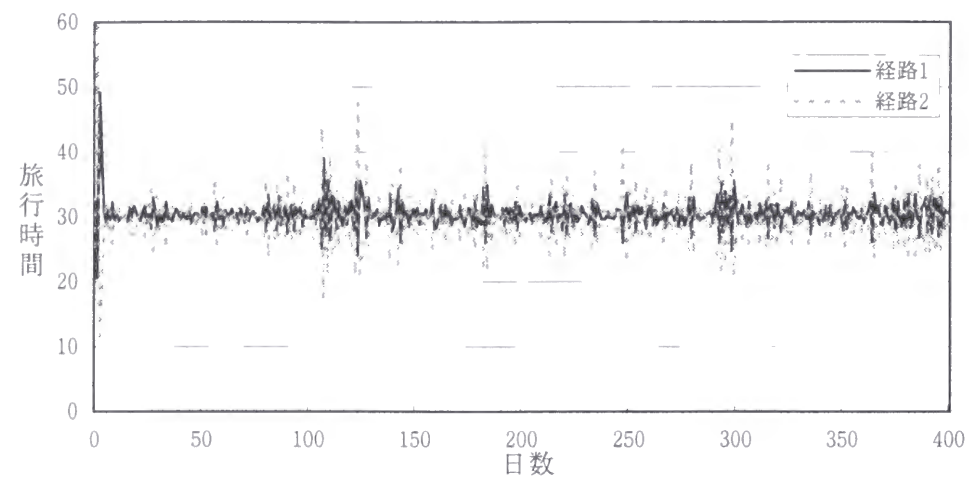


図 7.3.1 両経路の旅行時間 (ケース2a,  $c = 0.95$ )

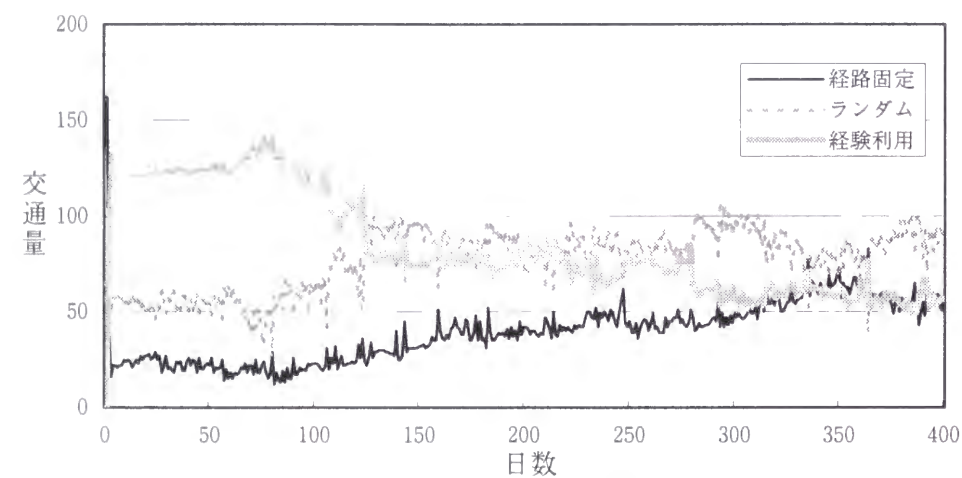


図 7.3.2 各ヒューリスティックタイプの交通量 (ケース2a,  $c = 0.95$ )

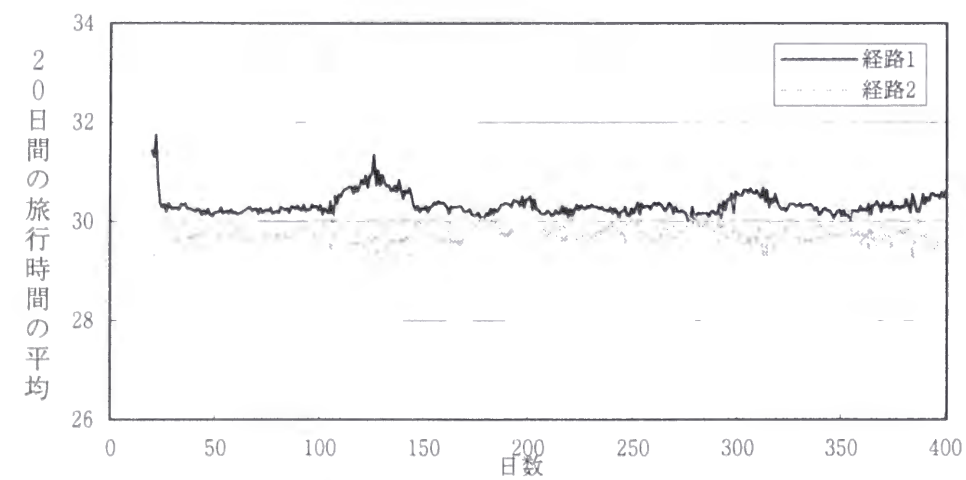


図 7.3.3 両経路の20日間の旅行時間の平均 (ケース2a,  $c = 0.95$ )

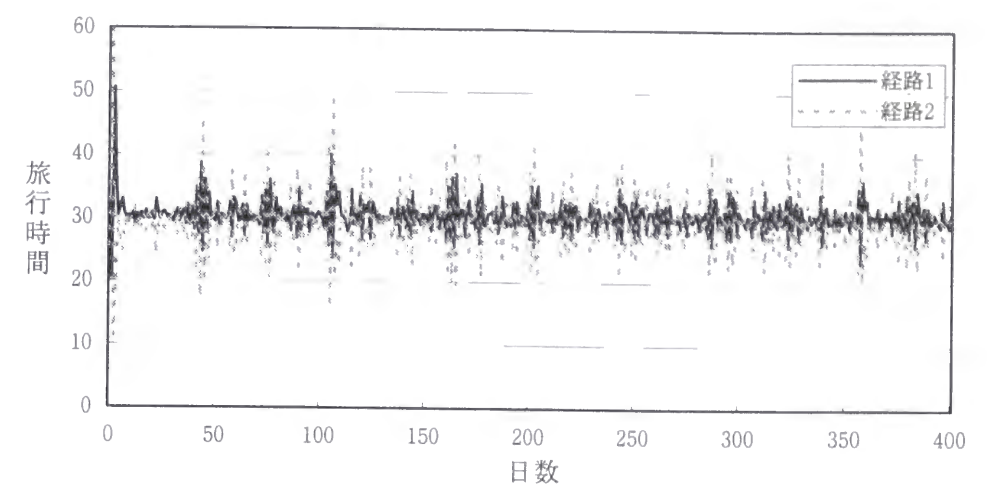


図 7.4.1 両経路の旅行時間 (ケース3a,  $c = 0.90$ )

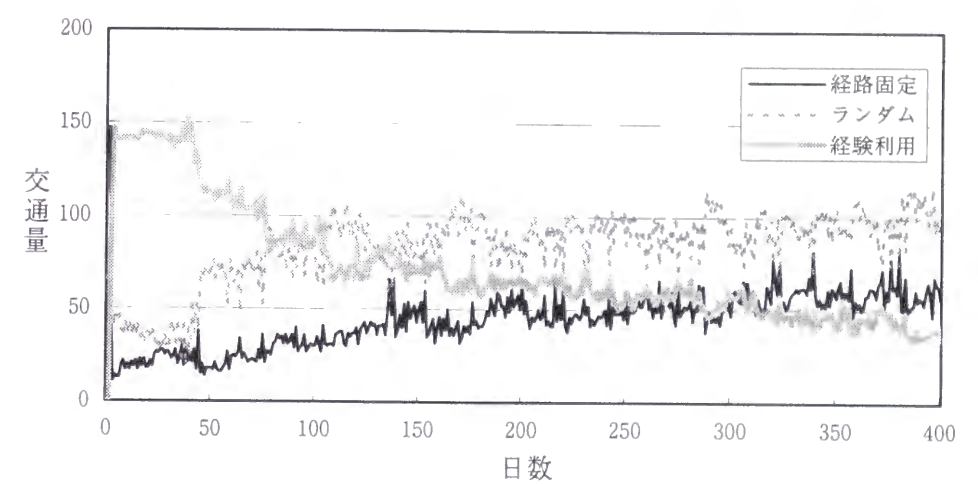


図 7.4.2 各ヒューリスティックタイプの交通量 (ケース3a,  $c = 0.90$ )

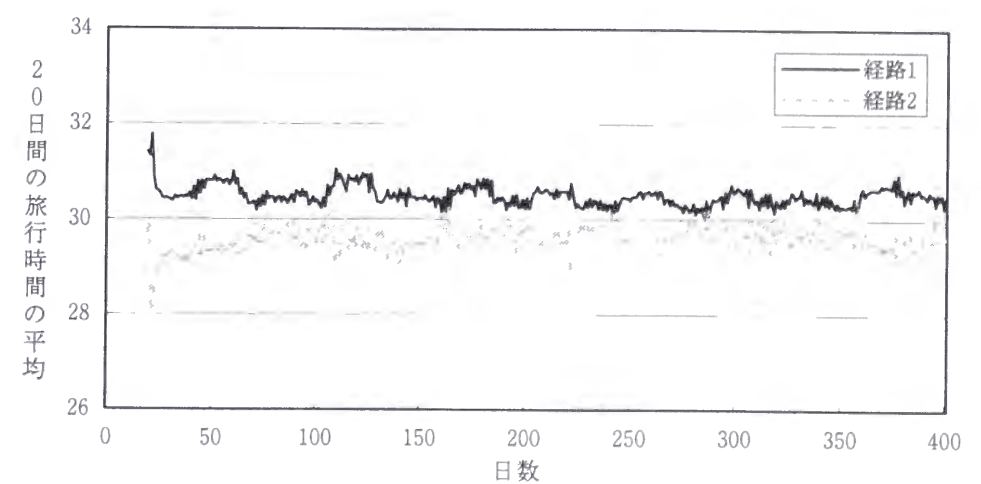


図 7.4.3 両経路の20日間の旅行時間の平均 (ケース3a,  $c = 0.90$ )

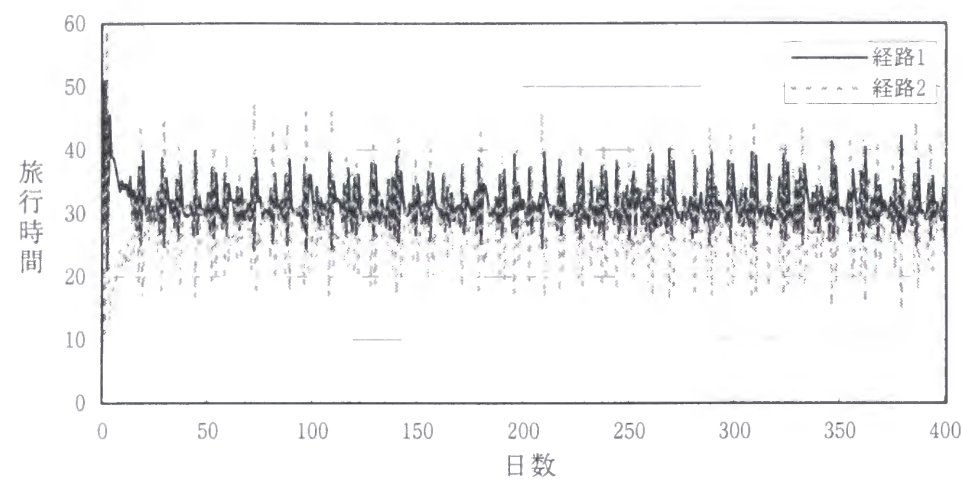


図 7.5.1 両経路の旅行時間 (ケース4a,  $c = 0.50$ )

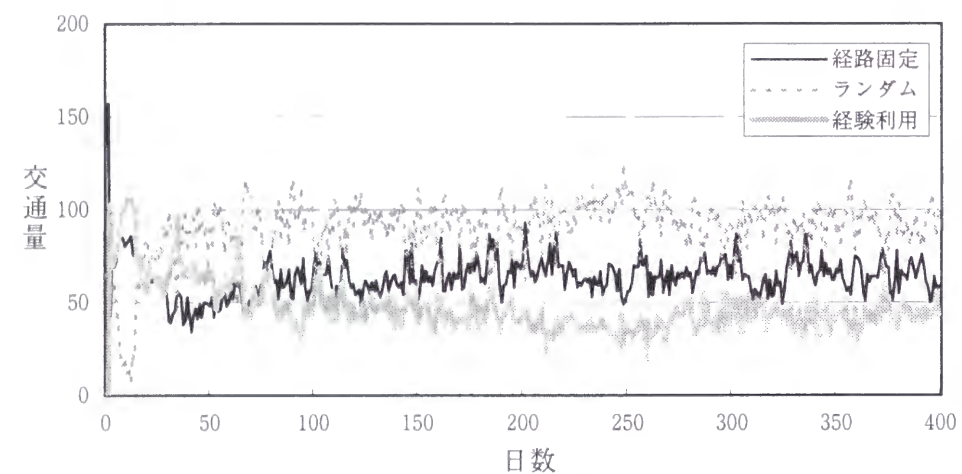


図 7.5.2 各ヒューリスティックタイプの交通量 (ケース4a,  $c = 0.50$ )

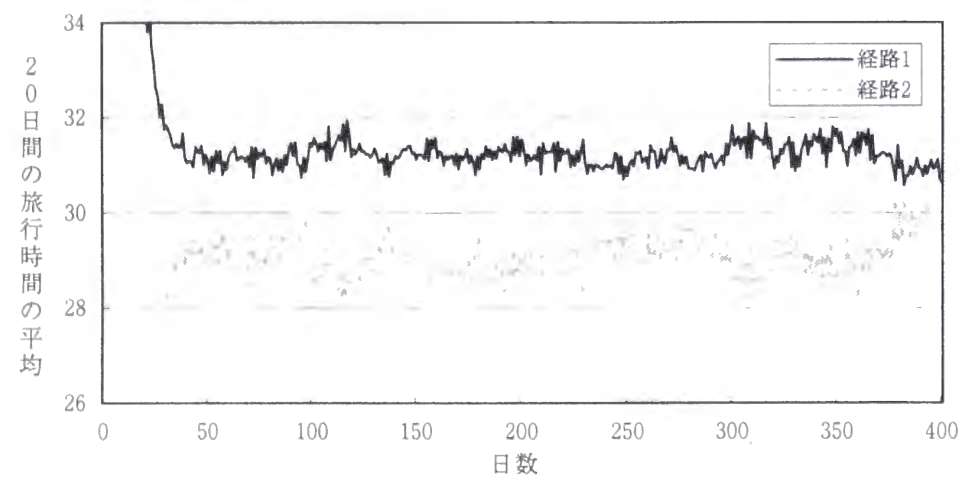


図 7.5.3 両経路の20日間の旅行時間の平均 (ケース4a,  $c = 0.50$ )

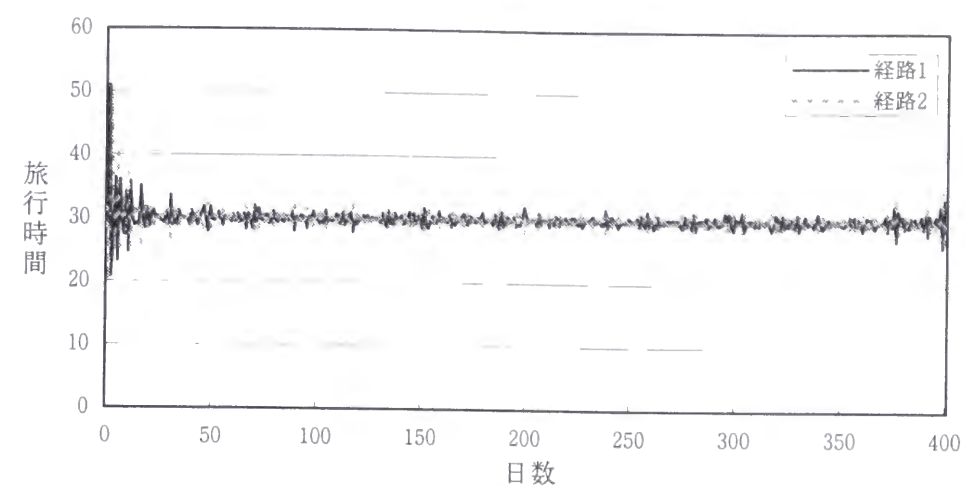


図 7.6.1 両経路の旅行時間 (ケース1b,  $c = 0.99$ )

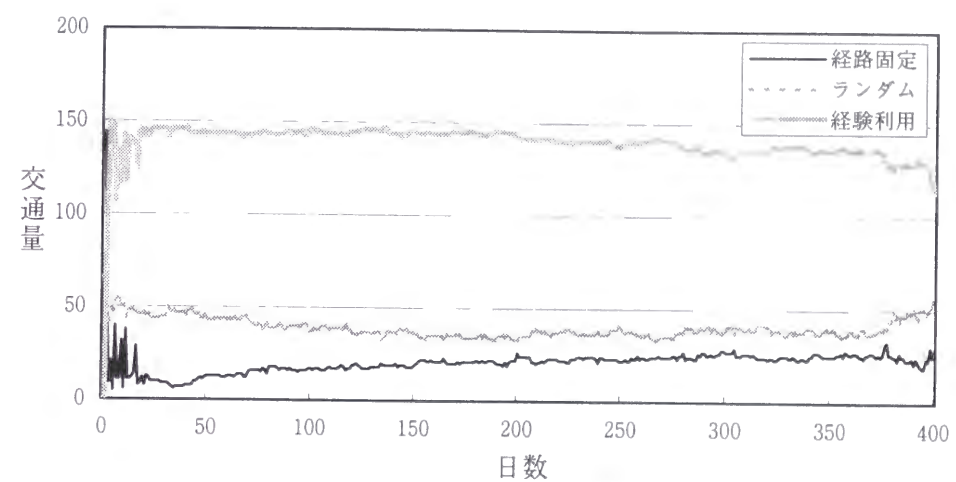


図 7.6.2 各ヒューリスティックタイプの交通量 (ケース1b,  $c = 0.99$ )

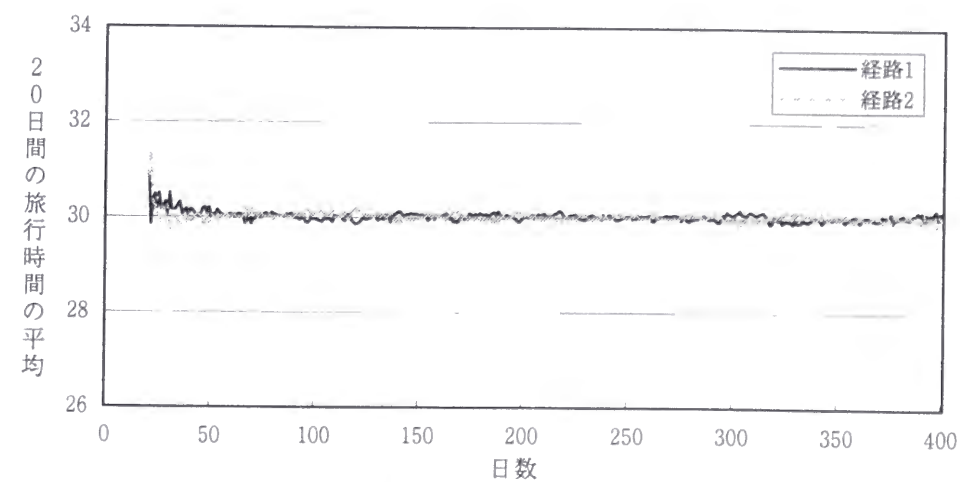


図 7.6.3 両経路の20日間の旅行時間の平均 (ケース1b,  $c = 0.99$ )

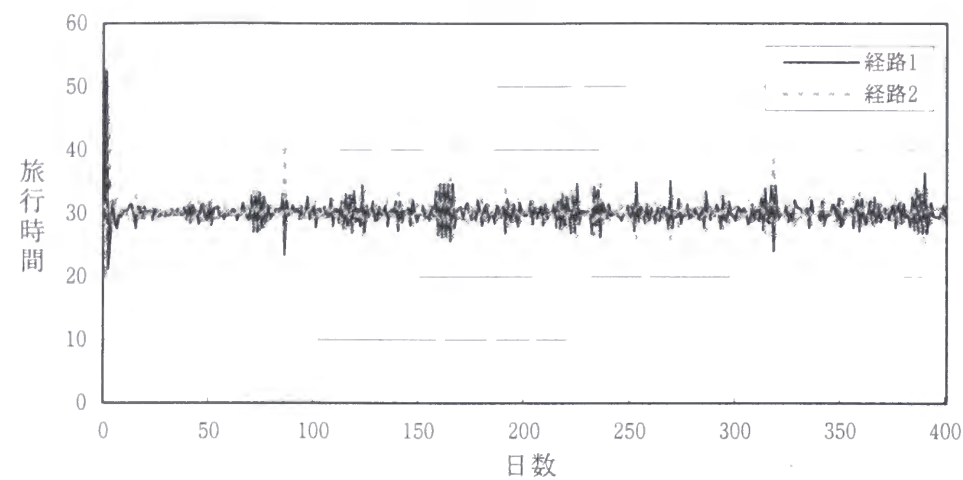


図 7.7.1 両経路の旅行時間 (ケース2b,  $c = 0.95$ )

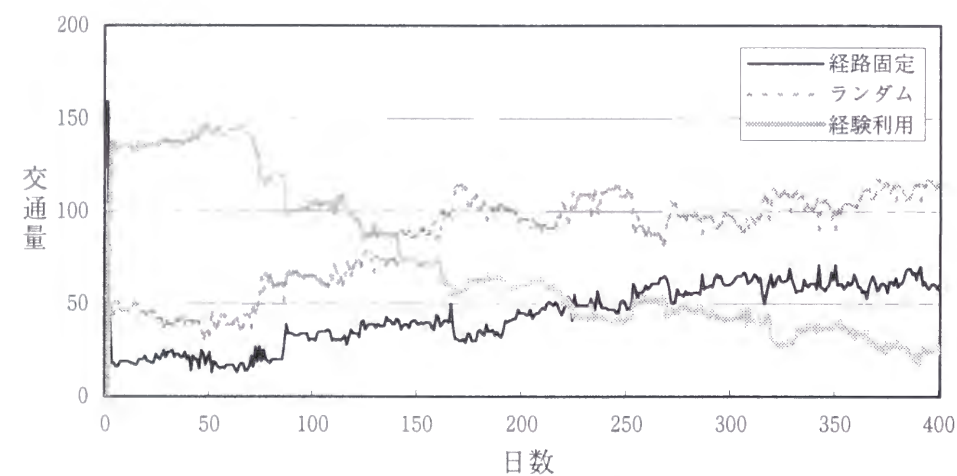


図 7.7.2 各ヒューリスティックタイプの交通量 (ケース2b,  $c = 0.95$ )

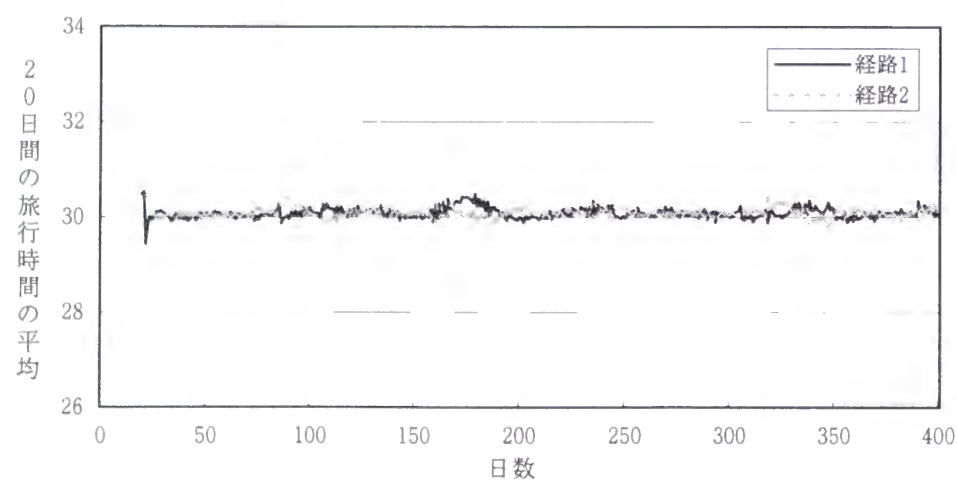


図 7.7.3 両経路の20日間の旅行時間の平均 (ケース2b,  $c = 0.95$ )

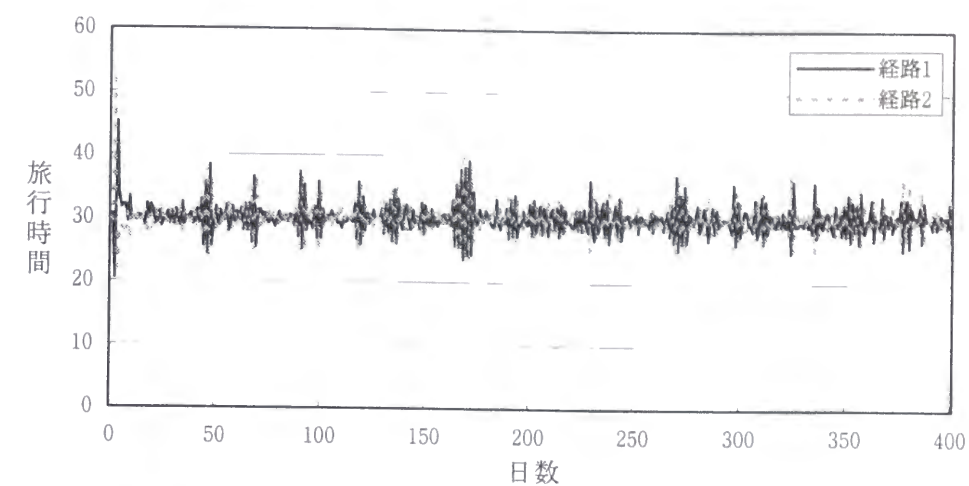


図 7.8.1 両経路の旅行時間 (ケース3b,  $c = 0.90$ )

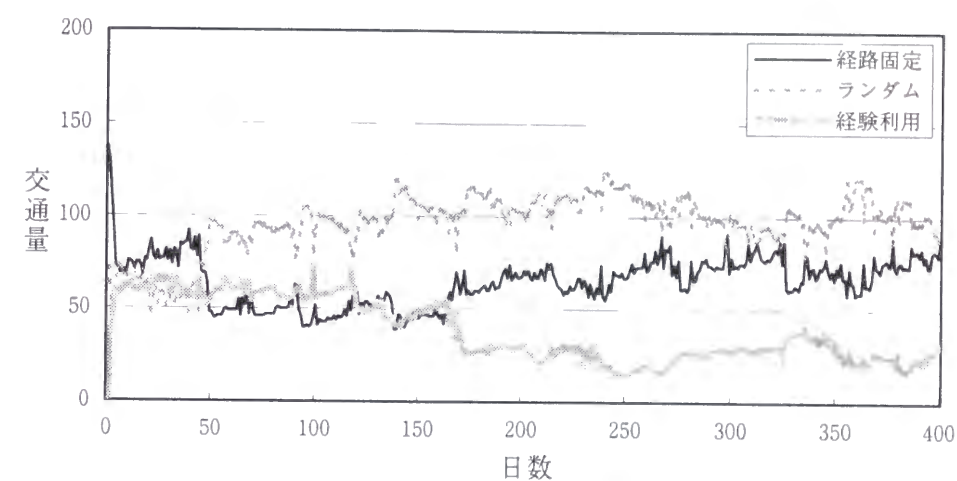


図 7.8.2 各ヒューリスティックタイプの交通量 (ケース3b,  $c = 0.90$ )

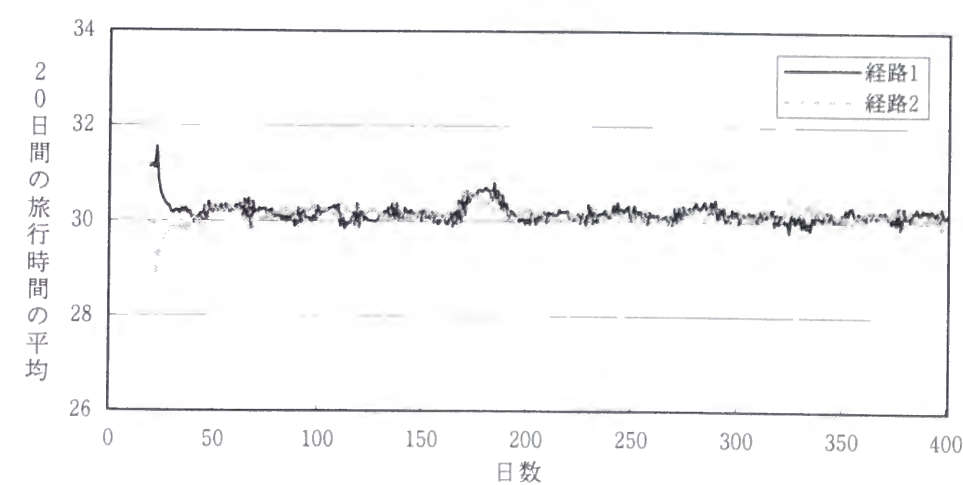


図 7.8.3 両経路の20日間の旅行時間の平均 (ケース3b,  $c = 0.90$ )

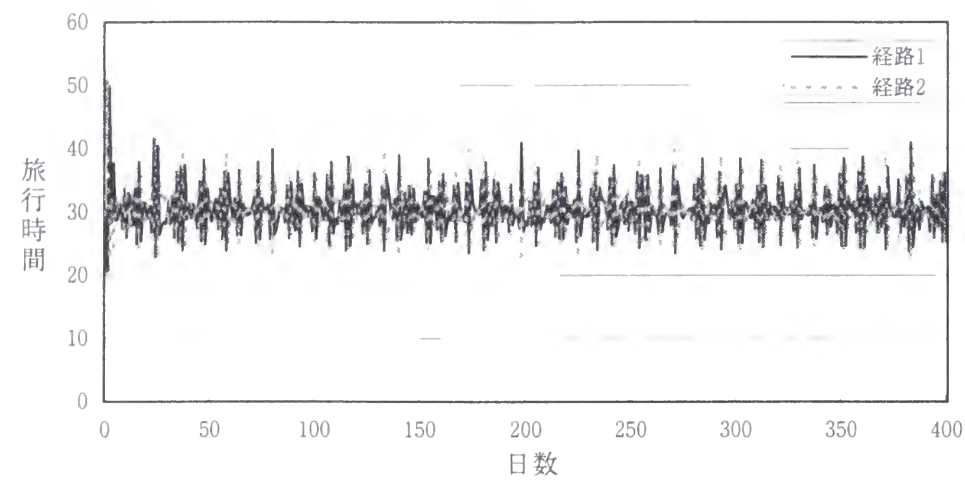


図 7.9.1 両経路の旅行時間（ケース4b,  $c = 0.50$ ）

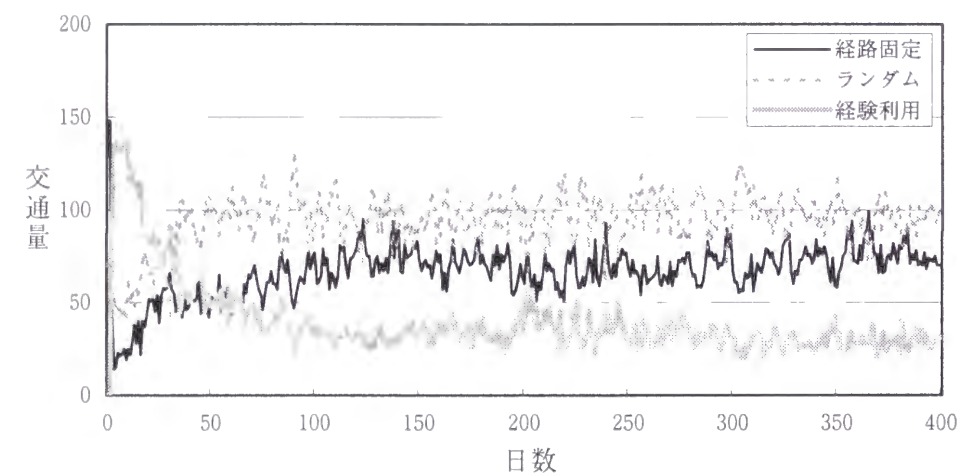


図 7.9.2 各ヒューリスティックタイプの交通量（ケース4b,  $c = 0.50$ ）

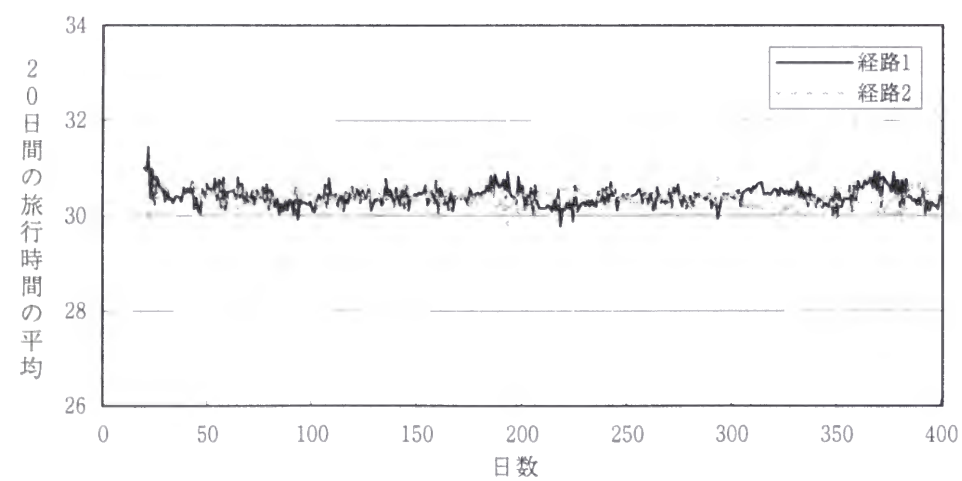


図 7.9.3 両経路の20日間の旅行時間の平均（ケース4b,  $c = 0.50$ ）

注

- [1] Tversky & Kahneman (1974) は、不確実性下では、人間は確率・統計学的に正しい方法によって判断しているのではなく、もっと大まかで単純な方法（ヒューリスティクス）によって判断していると述べている。
- [2] 両経路の20日間の旅行時間の平均の推移の図では、折れ線の  $i$  日目の値が  $(i - 19)$  日から  $i$  日までの20日間の旅行時間の平均である。



## 参考文献

- Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual, Urban Planning Division, U. S. Department of Commerce, Washington D. C.
- Nakayama, S., R. Kitamura, and S. Fujii (2000) Drivers' Route Choice Heuristics and Network Behavior: A Simulation Study Using Genetic Algorithms, To be presented at the 9th meeting of the International Association for Travel Behavior Research, Gold Coast.
- Tversky, A. and D. Kahneman (1974) Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, Science, vol.185, pp.1124-1131.

## 第8章 行動主体の帰納的学習と交通システムの挙動

### 8.1 帰納的学習と経路選択

#### 8.1.1 本章の目的

本研究は行動主体の認知過程が考慮された交通システムモデルを構築し、その挙動について考察するものである。第6章では、シミュレーション分析の結果、多くの行動主体が、現状と著しく異なる認知を持つ「思い込み」(delusion)状態に陥ることによって、「思い込み均衡」(deluded equilibrium)と呼ぶ均衡が形成され得ることが示された。上述のモデルでは、行動主体は知覚旅行時間(予測旅行時間)の最も小さい経路を走行するとし、その知覚旅行時間は過去に経験した旅行時間の重み付き平均として定式化され、その重みは遺伝的アルゴリズムによって変更されるものと仮定されている。重み付き平均による知覚旅行時間の定式化は頻繁に用いられるものであるが(Horowitz, 1984; 飯田等, 1989)、そのような知覚旅行時間の定式化が適切であるかどうかは明らかではない。また、そもそも、人間は不確実性下においては、非常に簡便化された方法(ヒューリスティクス)を用いて思考するとされ、必ずしも知覚旅行時間を形成し、それを中心に経路を選択しているとは限らないと考えられる。したがって、前章は、ヒューリスティクスを用いた経路選択モデルを提案した。しかし、そこでのモデルは、行動主体は外生的に与えられたヒューリスティクスしか用いないという仮定に基づいていた。

そこで、本章では、行動主体が自らの経験によりどのように経路選択を行うのかという規則・方法(ヒューリスティクスを含む)を内生的に形成する過程、すなわち「帰納」を取り扱う。帰納的認知過程を通じて経路を選択する行動主体を含む交通システムモデルを構築し、シミュレーション分析によって経路選択行動及び交通システムの挙動を考察することが本章の目的である。

#### 8.1.2 経路選択における帰納

第4章で述べたように認知心理学では、人間は抽象的で規範的な規則を適用した演繹的な推論を行っているのではなく(Johnson-Laird, 1983; Cheng & Holyoak, 1985)経験した個々の事象から仮説を立て、それを適用するという帰納的な推論を行っている(Holland

et al., 1986) とされる。

本研究で対象としている経路選択行動では以下のような帰納の例が考えられる。ある経路で通常よりかなり混雑した日の翌日は空いていたという経験のある行動主体が何度か積むとする。その行動主体は走行経路が通常よりも混雑していると、翌日のその経路は空いていると期待するに至るであろう。これは、混雑の翌日は空いていたという単なる経験情報が一般化され、そして、それが知識として貯蔵されるとともに、次回からその知識が予測に適用されるようになったことを意味する。このように過去の経験に基づいて「混雑の翌日は空いている」というような仮説（知識）を形成する過程が帰納である。

Holland et al. (1986) はこのような帰納を計算論的に取り扱う枠組みを示している。それは if-then ルールを用いるプロダクションシステム (Newell & Simon, 1972) が基本となっており、そのルールが遺伝的アルゴリズムにより修正されることにより帰納のプロセスが記述される。ここで、プロダクション・システムとは、条件部と実行部から構成される if-then ルールによって問題を解決するシステムである。与えられた問題は符号化され、それと条件部が合致する if-then ルールがあれば、その符号化された情報はそのルールの実行部に置き換えらる。そのような処理をその情報が解に到達するまで繰り返す。これらがプロダクション・システムにおける問題解決の基本的メカニズムである。

本章では、帰納の過程をモデル化するに際して、Holland et al. (1986) と同様の枠組みを用いる。本章でこの枠組みを用いる理由は、一つにはそれが心理学的な根拠を持つからであり、もう一つはそれが数値計算に適しているからである。

## 8.2 シミュレーションモデルの概要

本章では、図 8.1 に示すようなシミュレーション・モデルを構築した。本シミュレーション・モデルも第 6 章および第 7 章と同様に経路選択モデルと交通流モデルから構成される。

### 8.2.1 経路選択モデル

#### (1) 経路選択モデルの概要

本章では、行動主体は、1) if-then ルールに基づいて行動を決定する、2) 過去  $m$  日分の走行経路とその時の旅行時間を記憶している、と仮定する。

経路選択モデルの基本的メカニズムは、以下の通りである：1) 行動主体が記憶する過去  $m$

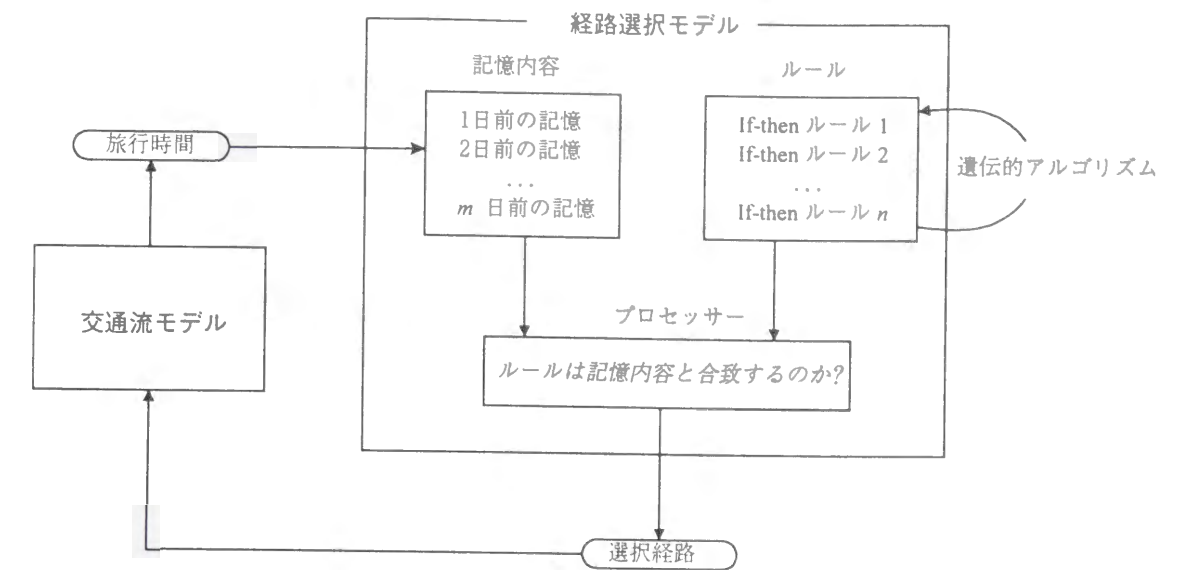


図 8.1 シミュレーションモデルの概要

日間全ての走行経路およびその旅行時間と合致する条件部を持つ if-then ルール（以下、「活性化」したルール）が指示する経路が選択される、2) 合致したルール、すなわち「活性化」したルールが複数ある場合は、ルール評価値が最も小さいルールの指示する経路が選択され、活性化するルールがない場合は、経路はランダムに選択される、3) 遺伝的アルゴリズムによりより優れたルールが生成されるとともに、ルール評価値が走行経験に合わせて更新される。ここで、ルール評価値とはそのルールがどれ程優れたものを表す指標であり、それが小さいルールほど優れたルールであるとしている。

#### (2) 記憶

現実の行動主体が旅行時間を連続実数として正確に記憶するものではないのと同様に、行動主体も連続数として旅行時間を記憶するのではなく、旅行時間がどれ程であったかを近似的に記憶していると仮定する。本稿では、時間を  $n$  区間に分割し、行動主体は経験した旅行時間と対応する区間のラベル、 $k(=1, 2, \dots, n)$ 、を記憶するとした。

#### (3) if-then ルールの構造

If-then ルールは if に対応する条件部と then に対応する実行部から構成される。実行部にはそのルールが指示する選択経路  $y$  が記載される。条件部は、0 または 1 の値をとるビット  $x_{ijk}$  から構成される。ここで、 $i(=1, 2, \dots, l)$  は経路、 $j(=1, 2, \dots, m)$  は記憶日（過去何日目の記憶であるのか）、 $k(=1, 2, \dots, n)$  は旅行時間の区間を表わす。そして、 $m$  個の記

#### ある行動主体の記憶

前日：経路1を32分で走行  
前々日：経路2を28分で走行

	前日				前々日			
経路1	0	0	1		0	0	0	
経路2	0	0	0		0	1	0	
	20	25	30	35	20	25	30	35 分

#### if-thenルール

	前日				前々日				
経路1	0	0	1		1	1	1		→ 経路2
経路2	0	0	0		1	1	1		
	20	25	30	35	20	25	30	35 分	

図 8.2 記憶と if-then ルールの例

憶に対応する  $m$  個のビット全てが 1 である場合、そのルールは活性化したということになる。

図 8.2 は、経路数が 2、記憶日数  $m$  が 2、区間数  $n$  が 3 の場合、前日に経路 1 を 32 分で走行し、前々日は経路 2 を 28 分で走行した行動主体の記憶と if-then ルールの 1 例である。図 8.2 の上半分が示すように行動主体の記憶は 0 および 1 の値しかとらない行列として表現することができる。その行動主体の前日の記憶は (1,3) の 1 によって、前々日の記憶は (2,5) の 1 によって表示されている。

If-then ルールの条件部は記憶と同じ行列形式によって表現される。図 8.2 の下半分の if-then ルールでは、前々日に対応するビットは全て 1 の値をとっており、前々日の記憶がどのようなものであっても前々日に関しては合致することになる。また、図 8.2 のルールでは、行動主体の前日の記憶に対応するビット (1,3) と前々日の記憶に対応するビット (2,5) がともに 1 の値をとるものであるため、それは活性化され、行動主体はルールが指示する経路 2 を選択することになる。

各ルールはそのルールがどれ程うまく働くかを表わす指標であるルール評価値をそれぞれ持つ。複数のルールが活性化した場合、そのうちいずれのルールが実行されるかに関しては、帰納の考え方に従って、今までに旅行時間の小さい経路をより多く指示していたルール（ルール評価値が小さいルール）が実行されとする。活性化したルールのうち、実際に走行した経路と同じ経路を指示したルール  $j$  の評価値は次式に従って更新される。

$$f_i^j = c \cdot f_{i-1}^j + (1-c) \cdot t_{i-1} \quad (1)$$

$f_i^j$  :  $i$  日目のルール  $j$  の評価値

$t_{i-1}$  : 前日の旅行時間

$c$  : パラメータ ( $0 \leq c \leq 1$ )

ここで、実際に走行した経路と同じ経路を指示したルールのみルール評価値を更新するのは、行動主体は走行しなかった経路の旅行時間は知り得ないため、そのようなルールのルール評価値を更新することができないからである。

#### (4) 学習

行動主体の学習は、if-then ルールおよびそのルール評価値の修正・更新として記述される。本研究では、if-then ルールの修正・更新に遺伝的アルゴリズム (Goldberg, 1989; Holland, 1975) を用いている。

経験情報が一般化・抽象化されたものである知識 (第 4 章および 8.1.2 で述べた「仮説」) は if-then ルールによって表象される。本研究で遺伝的アルゴリズムを帰納過程のモデルに適用するに当たっての基本的な考え方は、優れた仮説、すなわちルール評価値の小さい if-then ルールの生存する確率は高く、また、交叉や突然変異という遺伝的操作が繰り返される中で、優れた仮説 (if-then ルール) が生成される、というものである。

本章の遺伝的アルゴリズムでは、if-then ルールの条件部  $x_{jk}$  および実行部  $y$  がビット列と見なされ、それに対して再生産・交叉・突然変異の遺伝的操作が繰り返される。再生産とは、ルール評価値に応じてビット列が再生産されることであり、本章では、ルール評価値の最も大きい  $a$  個のビット列が削除され、ルール評価値の最も小さい  $a$  個のビット列が繁殖されとする。繁殖されたルールはされなかったルールのうちからランダムに選ばれたルールとペアを作る。そして、そのルール・ペアについて互いのビット列の一部を入れ替え新たなビット列を生成するのが交叉である。また、ある小さな確率  $p_m$  でビットの値を変化させるのが突然変異である。

#### 8.2.2 交通流モデル

交通流モデルとしては、本章でも、第 6 章および第 7 章と同様の BPR 関数を用いる。

#### 8.3 数値実験

上述のシミュレーションモデルを用いて、2 つの経路により 1 対の起終点 (OD) 間が連



表 8.1 記憶およびルールにおける旅行時間の区分

区間	1	2	3	4	5	6	7	8
旅行時間	10～20	20～25	25～29	29～31	31～35	35～40	40～50	50～

表 8.2 適切に思考されているパターン

	記憶日数 $m$	一人のルール数 $S$	繁殖数 $a$	突然変異確率 $p_m$
ケース 1	2	50	1	0.01
ケース 2	5	125	1	0.01
ケース 3	2	125	1	0.01
ケース 4	2	125	5	0.01

結された単純な道路網に 200 人の行動主体を繰り返し走行させる数値実験を行った。行ったのは以下のようなパラメータによる 48 パターンの実験である。行動主体の情報処理能力に関するパラメータとしては、行動主体が記憶する日数  $m$  が 2 および 5、一人の行動主体が持つルール数  $S$  が 50 および 125、である。遺伝的アルゴリズムによるルールの学集に関しては、繁殖数 (8.2.1 経路選択モデル (4) 学習 で述べたように交叉組数と同一) が 1 および 5、突然変異確率  $p_m$  が 0.01 および 0.001、である。そして、ルール評価値の更新のパラメータ  $c$  が 0.5、0.90 および 0.99、である。

数値実験の結果、「活性」するルールがなく、ランダムに選択する行動主体が常に全体の 1 割以上存在するパターンが多数あった。このようなパターンは、行動主体の思考を適切に再現しているとは言えないため、除外することとする。残りのパターンは表 8.2 の通りである。ただし、ルール評価値の更新のパラメータ  $c$  による影響はほとんど見られなかったため、そのパラメータに関しては記載していない。以下では、行動主体の情報処理能力が最も小さいケース 1 と最も大きいケース 2 について説明する。なお、ルール評価値の更新のパラメータ  $c$  は 0.9 のものである。また、交通流モデルのパラメータに関しては、 $\alpha, \beta$  が両経路とも共に 2.0、そして、経路 1 では  $t_f = 20.0$ ,  $C = 200$ 、経路 2 では  $t_f = 10.0$ ,  $C = 100$  である。また、旅行時間の区間数  $n$  は 8 であり、その区分は表 8.1 の通りである。総交通量や交通容量の設定は、計算上の理由により、現実の交通システムに比べて非常に小さい値となっている。しかし、この点が交通システムや経路選択行動の挙動に本質的な影響を与えることはないと考えられる。また、if-then ルールのビットの初期値としては、条件部はすべて 1 とし、実行部はランダムに 1 または 0 を発生させたものを用いた。

### 8.3.1 利用者均衡との比較

上述の二つケースについて数値実験を行った。図 8.3 はケース 1 の 200 日までの旅行時間を示し、図 8.4 は、ケース 2 の 200 日までの旅行時間を示している。図 8.5 は、各ケースの全行動主体の全ての条件部のビット・(値は 1 または 0) の平均値である。図 8.5 から、ほぼ 300 日頃になると、全体のビットは収束しており、定常状態になったと考えられる。

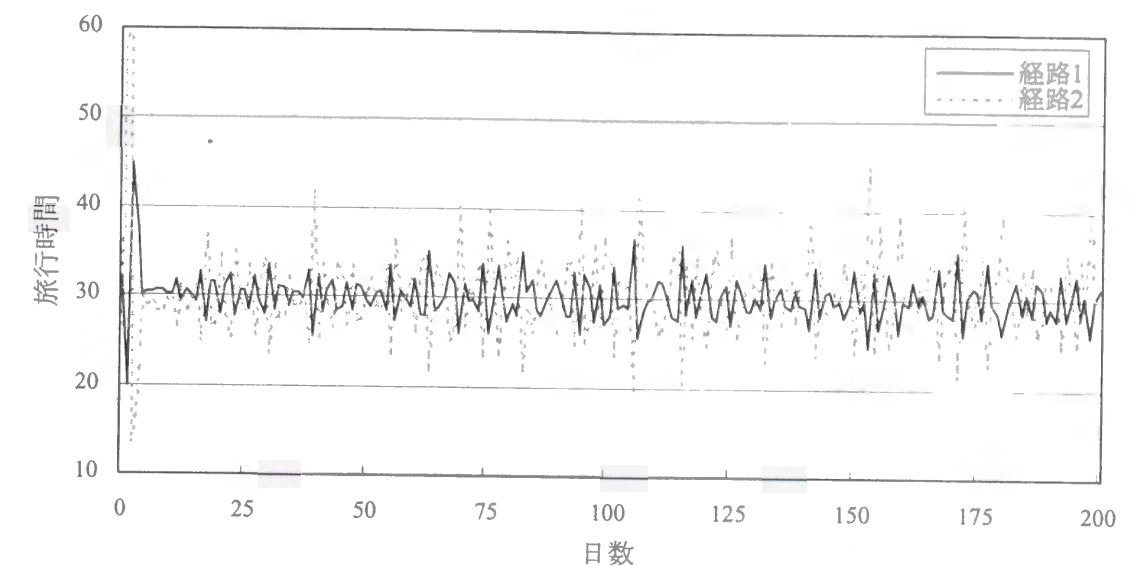


図 8.3 ケース 1 での 200 日までの旅行時間

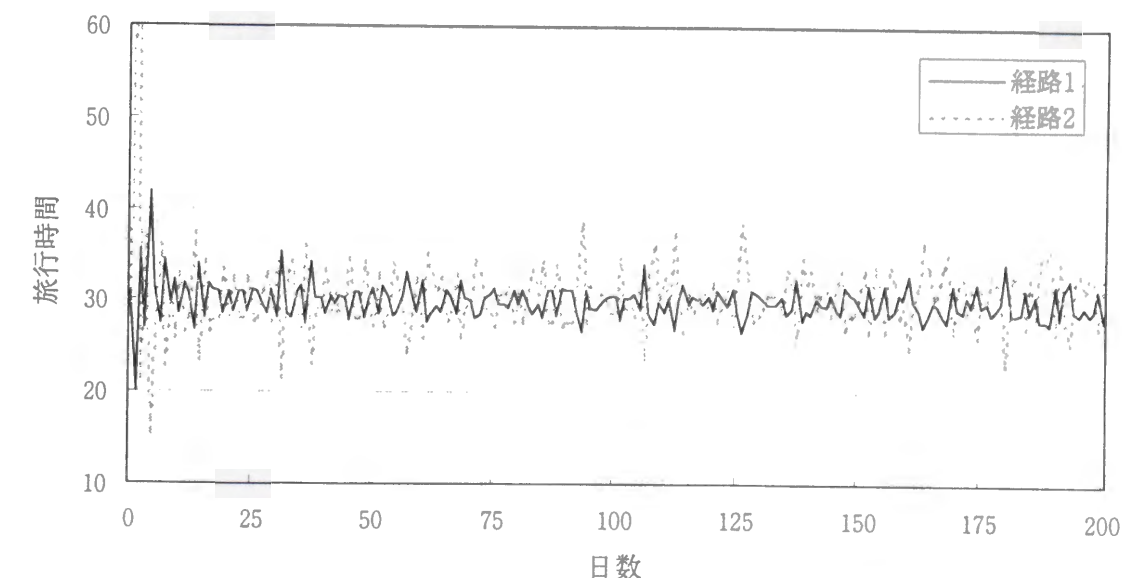


図 8.4 ケース 2 での 200 日までの旅行時間

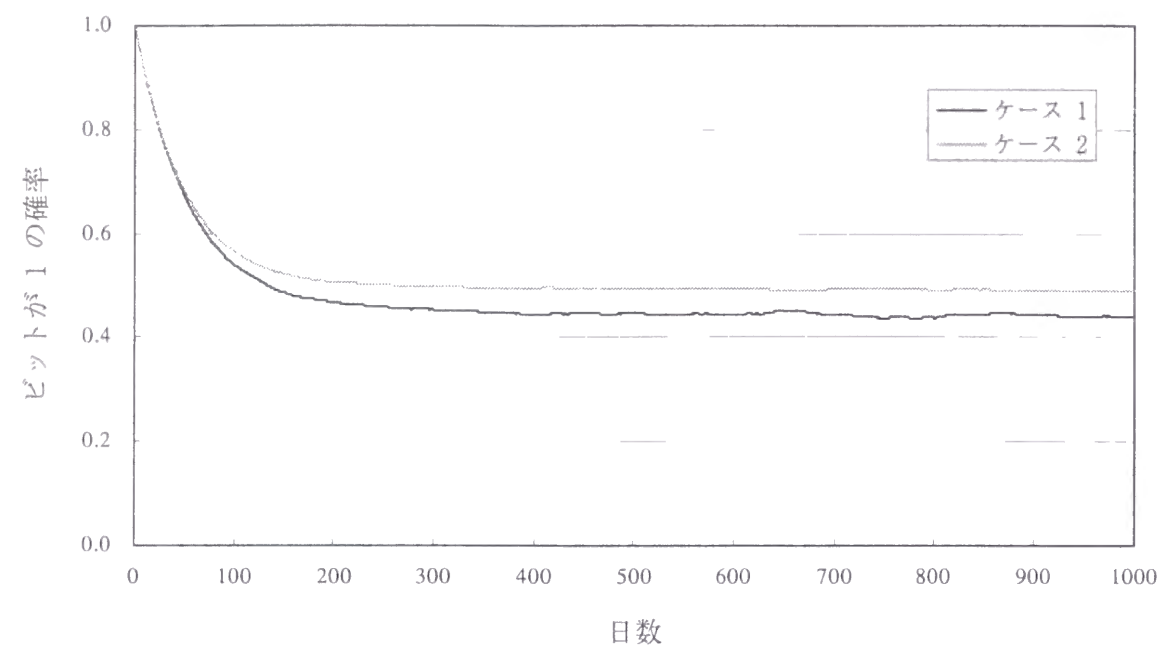


図 8.5 If-then ルールの行為部のビットの平均値

各ケースのそれぞれ 5 回分のモンテ・カルロ・シミュレーション (No.1, No.2, No.3, No.4, No.5) の 500~1000 日における経路 1 の交通量の経時的平均と経時的分散および各ケース内での分散分析は表 8.3 の通りである。表 8.3 からそれぞれのケース内でのモンテ・カルロ・シミュレーション間の違いは見られないことが分かる。したがって、以下では各ケースの No.1 のモンテ・カルロ・シミュレーションについて述べることにする。

表 8.3 各ケースの経時的平均と経時的分散

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
ケース 1 経時的平均	98.1	98.3	98.3	98.1	98.1
経時的分散	105.4	101.9	100.8	107.6	103.9
ケース 2 経時的平均	97.3	97.1	97.2	97.1	97.2
経時的分散	50	53.9	65.4	55.8	52.5

分散分析

ケース 1		ケース 2	
F 値	F (4, 2500)	F 値	F (4, 2500)
0.07	2.38	0.12	2.38

まず、各ケースにおいてシステムが利用者均衡に収束しているか否かを検討する。ここでは、旅行時間の分散についても検討するために、第 2 章で述べた混合戦略ナッシュ均衡による利用者均衡を用いる。第 2 章で述べたように式 (2.3) を解くことによって行動主体の経路選択確率を求めることができ、それから経路交通量は両経路とも 100 と計算される（厳密には、経路 1 が 100.08394..., 経路が 99.91706...である）。また、分散は 50.0 である。

シミュレーションにおける交通量の経時的平均が均衡での交通量と一致するという帰無仮説は表 8.4 に示した  $t$  値により両ケースとも棄却された。また、ケース 1 とケース 2 との比較では、平均に関しては有意な差はなかった。分散に関しては、表 8.4 の  $\chi^2$  検定の結果から分かるように、均衡とシミュレーション結果の分散が等しいという帰無仮説はケース 1 でのみ棄却され、ケース 1 のみシミュレーション結果の分散が理論値より有意に大きいことが示された。また、ケース 1 とケース 2 との分散に関する比較では、有意な差は認められなかった。

以上の検定結果から、各ケースとも平均に関しては均衡に収束していないため、それぞれ利用者均衡に収束しているとは言い難い。また、分散についての検定結果からより優れた学習機能を仮定したケース 2 の方がシステムが安定すること分かった。

### 8.3.2 帰納的学習の停止

次に、行動主体の帰納的学習が交通システムに及ぼす影響を検討するために、ケース 1 について 500 日目以降、行動主体が帰納的学習を行わない場合のシミュレーション（ケース 3）を行った。8.2.1 で述べた経路選択モデルに即して言うと、遺伝的アルゴリズムの操作を 500 日目以降停止する場合である。この時、499 日直後からそれ以降 if-then ルール群は変化することなく、行動主体はそれら変化しないルールを用いて経路を選択し続けることになる。このようなケース 3 の 400 日から 600 日の両経路の旅行時間が図 8.6 である。

表 8.4 シミュレーション結果と利用者均衡との平均及び分散に関する検定

	平均	$t$ 値	分散	$\chi^2$ 値
ケース 1	98.1	-4.07*	105.4	1055.7*
ケース 2	97.3	-8.38*	50.0	500.8

\*: 5% 有意

自由度 500 の 5%  $\chi^2$  値は 553.1

図 8.6 から分かるように、500 日を過ぎ数日経過すると、旅行時間の経時的平均が経路間で異なったものとなる。この結果は経路間の旅行時間の平均値がほぼ等しくなるためには個々の行動主体が帰納的学習を行うことが必要であることを示していると考えられる。したがって、ケース 1 やケース 2 のような旅行時間の平均がほぼ等しいという状態は全くの定常状態ではなく、交通システムの状態は絶えず変化するものの、行動主体も絶えず帰納的学習を行い、交通状態の変化に適応した結果であり、ある意味において非常に動的な状態であると考えられる。

### 8.3.3 思い込みと習慣化

ケース 1 では、図 8.3 から分かるようにシミュレーション初期の短い期間 6~16 日では、交通状態は安定している。この時の経路変更者数は 20 人未満と比較的少ない。これは、最初の 5 日間では旅行時間が大きく変動しており、走行経験の少ない中で極端な旅行時間を経験した行動主体が偏った知識・情報を持ち、経路変更を行わなくなったためである。この現象は第 6 章で述べた「思い込み」(delusion)である。図 8.3 が示すケース 1 の結果では、このような「思い込み」が生じるものの、それは行動主体が走行経験を積み、学習する中で解消されている。

ケース 1 ついて、ルールの実行部のビットに突然変異の確率を 10 分の 1 にしたモンテ・

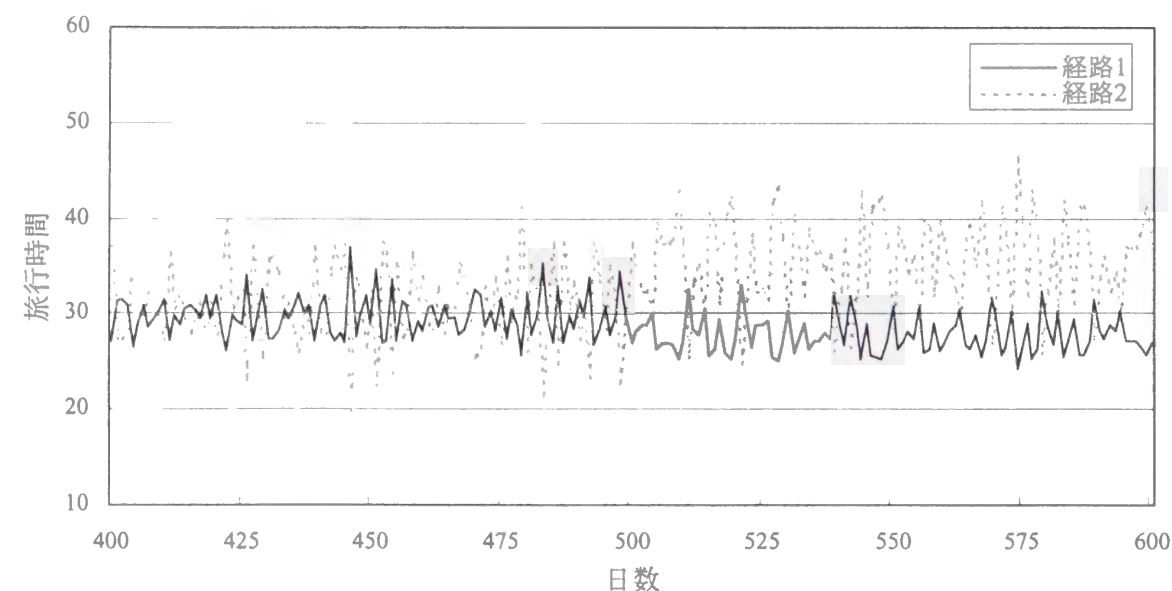


図 8.6 ケース 3 の 400 日から 600 日の旅行時間

カルロ・シミュレーション (ケース 4) およびルールの実行部の突然変異を全く行わせないモンテ・カルロ・シミュレーション (ケース 5) を実施した (他の設定はすべて同じである)。ケース 4 の 200 日までの旅行時間が図 8.7 であり、ケース 5 の 200 日までの旅行時間が図 8.8 である。図 8.3, 図 8.7, 図 8.8 から if-then ルールの実行部の突然変異確率が小さくなるほど、思い込みの期間 (交通状況が安定している期間) が増加していることが分かる。

ここで、思い込みに関して詳細に検討するために経路評価値という指標を用いる。経路評価値はある行動主体の経路に対する評価値であり、その経路を指示する全てのルールのルール評価値の平均値として算出される。既に述べたように、活性化したルールのうち、実際の走行経路と同じ経路を指示したルールのルール評価値が式 (1) に従って更新される。式 (1) から分かるようにルール評価値は経験した旅行時間の重み付き平均であるため、同じ経路を指示するルールのルール評価値の平均値はその行動主体が経路について持つ認知所要時間の指標となり得る。

図 8.9.1 から図 8.9.10 はケース 1 の、図 8.10.1 から図 8.10.10 はケース 4 の、図 8.11.1 から図 8.11.10 はケース 5 の 10 日から 100 日までの 10 日ごとの全行動主体の経路評価値の散布図である (これらの図は章末に掲載)。一つのプロットの x 座標はある行動主体が経路 1 について持つ経路評価値であり、y 座標が経路 2 の経路評価値である。散布図は旅行時間の平均値は各経路とも約 30 分であるため、経路評価値も約 30 となるはずのものである。

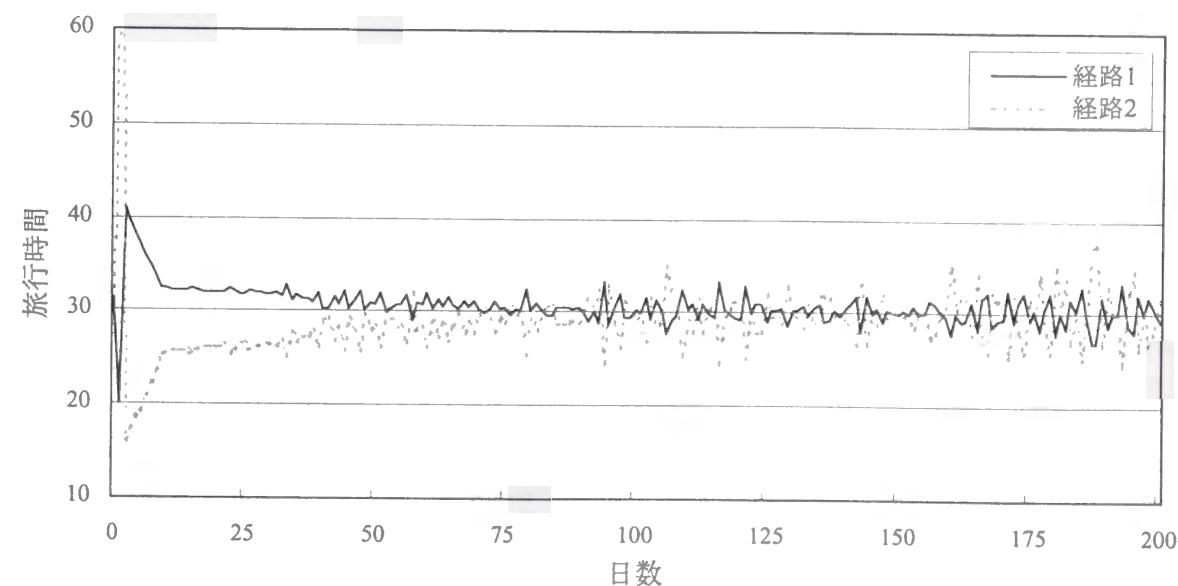


図 8.7 ケース 4 (実行部の突然変異半減) の 200 日までの旅行時間



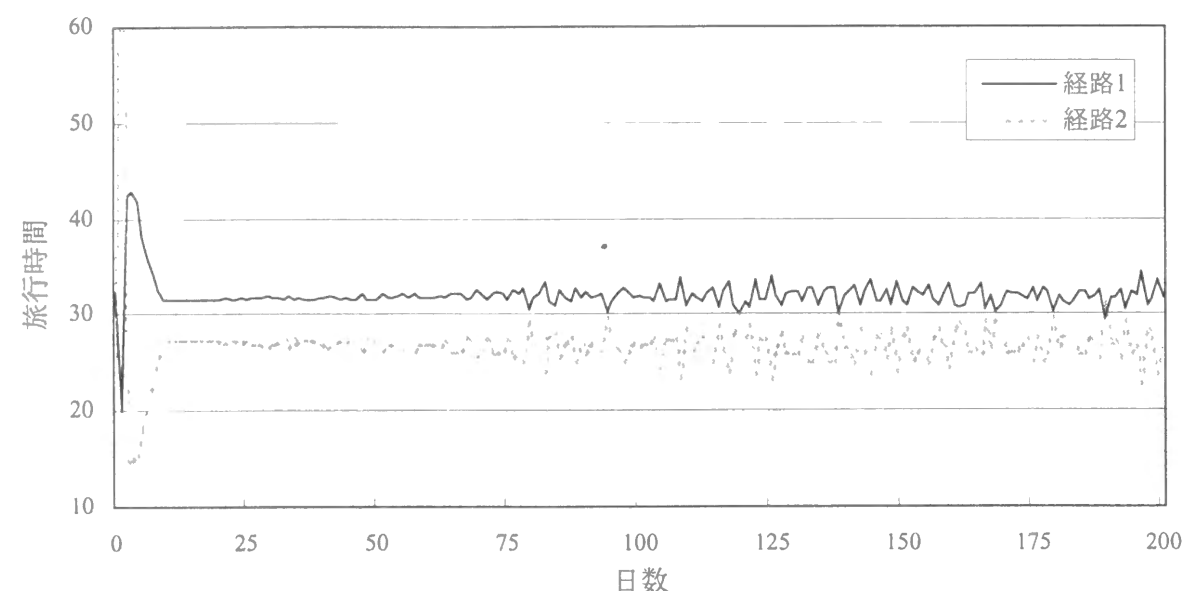


図 8.8 ケース 5 (実行部の突然変異半減) の 200 日までの旅行時間

ケース 1 では、図 8.9.1 や図 8.9.2 から分かるように 10 日目や 20 日目では、行動主体の一部は 30 からかけ離れたところに位置している。このような行動主体は現実の交通状況を「正しく」認知していないという「思い込み」(第 6 章参照)を起こしている。5 日目まで旅行時間は大きく変動しているが(図 8.3 参照)、走行経験に少ない時期にそのような極端な旅行時間を経験し、ある一方の経路の旅行時間は大きいと認識した行動主体はその経路を再び走行することはなくなる。そのような行動主体のその経路の旅行時間の記憶は初期の極端なもののみで、更新されることはなく、認知状態は現状とかけ離れたままのものとなる。すなわち、「思い込み」認知が生じる。しかし、ケース 1 の場合、30 日目には行動主体の「思い込み」は解消されている(図 8.9.3 参照)。これは、if-then ルールの実行部が突然変異のために変化するため、もう一方の経路(旅行時間が大きいと思い込んでいた経路)を走行することがあるからである。たとえ「思い込み」を起こした行動主体であっても、突然変異の影響により、旅行時間が大きいと思い込んでいる経路をたまたま走行することにより、現状を把握することができ、「思い込み」が解消される。ケース 1 の図 8.3 では、6 日から 16 日まで旅行時間は比較的安定し、17 日以降変動しているが、6 日から 16 日では「思い込み」を起こしてある一方の経路のみを走行していた行動主体がある程度存在したため安定していたが、そのような行動主体が突然変異のため、もう一方の経路を走行するようになり、「思い込み」が徐々に解消され始め、17 日以降は旅行時間が変動するようになった。

ケース 1 よりもルールの実行部の突然変異確率が 10 分の 1 であるケース 4 の場合、図 8.7

から約 60 日頃まで旅行時間は比較的安定しており、旅行時間は経路 1 の方が経路 2 よりも常に大きくなっている。図 8.10.1 から図 8.10.6 で分かるように、60 日頃までは行動主体の多くは徐々に解消されつつあるものの、「思い込み」を起こしている。図 8.7 での 30 日頃から徐々に経路間の旅行時間差が小さくなり、多少旅行時間の変動が発生しているのは、if-then ルールの実行部の突然変異によって、「思い込み」を起こした行動主体がもう一方の経路を走行し始めたためであると考えられる。70 日前後からは図 8.10.7 から分かるように行動主体の「思い込み」がほぼ解消されている。「思い込み」が解消され、ある程度の時間が経過すると、旅行時間の変動が始まり、システムは比較的不安定になっている(図 8.7 参照)。

If-then ルールの突然変異がないケース 5 の場合は、40 日頃まで多くの行動主体が「思い込み」を起こしている(図 8.11.1 から図 8.11.4 を参照)。図 8.11.5 以降から分かるように、50 日前後以降は散布図のプロット数が大幅に少なくなっている。この理由は、多くの行動主体において、全てのルールが指示する経路がある一方の経路のみとなってしまう、一方の経路の経路評価値が計算できないために、そのような行動主体のプロットが散布図に記載されていないためである。このような行動主体は、「思い込み」が定着し、一方の経路しか走行しないということが習慣化し、他の経路を走行するということが全く考慮の対象外となっていることを意味する。ケース 4 の場合も、図 8.10.4 および図 8.10.5 (40 日から 50 日) から若干散布図のプロット数が減少していることを読み取ることができ、行動の習慣化を起こしている行動主体がいくらか存在していることが分かる。

「思い込み」が発生したり、解消したり、また、「思い込み」が持続し、行動が習慣化されたりするのは実行部の突然変異確率の大きさに依存している。この実行部の突然変異は合理的というよりむしろ「気まぐれ」に別の経路を走行することを意味する。「気まぐれ」に経路を変更することによってのみ、「行動主体は旅行時間は大きいと思い込んでいる経路を走行し、そこでの「本当」の状況を知ることができるため、「思い込み」が解消されることになる。経路変更にかかるコストなどの理由で「気まぐれ」が起こりにくい場合は、すべての行動主体が「思い込み」を起こし、システムは安定性の極めて高い「思い込み均衡」(第 6 章参照)が形成される。そして、「思い込み」の状態がある程度持続すると、行動主体の行動が固定化・習慣化し、その行動主体は他の経路を走行するということを検討すらなくなる。このように行動が習慣化され、行動が固定されてしまう現象は「凍結」(freezing)と呼ばれる(Lewin, 1958)。このように行動を凍結させた行動主体は、行動を全く変化させようとはしない。ここで、多数の行動主体の行動が「凍結」されることによって形成された交通システムの安定した状態を「凍結均衡」(frozen equilibrium)と呼ぶことにする。本章で明らかにした「凍結均衡」は、

既に第6章で明らかにした「思い込み均衡」がより強固に安定となったものと見ることができる。しかし、「凍結均衡」は、ある程度の期間、交通状況が安定すれば生じ得るものであり、必ずしも認知状態が実際の状態と異なるという意味での「思い込み」を前提とはしていない。ただし、行動主体が「思い込み」を起こすとシステムが安定しやすいため、「思い込み均衡」と「凍結均衡」との相関は高いと考えられる。

## 8.4 結果の考察

### 8.4.1 交通行動における「思い込み」と「凍結」

人間の行動は、習慣(habit)によって決定されるものと「熟考」(deliberation)によるものとに分けることができ、たいていの行動は習慣によるものと考えられている(Katona, 1951; Kornai, 1971)。新しい問題に直面した場合や状況が今まで異なる新しいものへ変化した場合、人間は様々な要因を考慮して十分に思考する「熟考」を行う必要があるが、そうでない場合は思考を省略し、認知的負荷を軽減することのできる習慣によって行動を決定する。既に述べた数値実験において、ケース1では、習慣が生じることなく、行動主体は熟考を続けている。また、ケース4では、習慣化は一時的なものであり、すぐに解消され、それ以後行動主体は熟考している。このような行動主体は、自分が常に新しい状況に直面していると認識しているため、熟考により行動を決定する必要があるからである。一方、ケース5では、行動は習慣化される。また、ケース4の40から50日頃では一部の行動主体の行動は習慣化されている。これは、前節で述べたように多くの行動主体が「気まぐれ」なども起こさず、同じ経路を走行するため、状況が変化せず、状況が変化しなければ、行動は習慣化される。行動が習慣化された場合、行動決定のための認知的負荷は大幅に軽減されることになる。ただし、ケース4では、習慣化した行動主体が一部であるため、システム全体の安定な状態は持続せず、行動主体は熟考する必要が生まれ、習慣化が解消されている。

これまで交通工学の分野においては習慣については、あまり注意が払われてこなかった。しかし、行動主体の習慣を考慮した交通機関選択モデルが少数であるが提案されており(Goodwin, 1977; Banister, 1978)、同じく機関選択行動における習慣の諸特性を考察した研究も行われ(Verplanken et al., 1994; Verplanken et al., 1997; Aarts et al., 1997)、習慣が機関選択時の一つの重要な要因であることが明らかにされている。

阪神高速道路の堺線の通行止め時におけるアンケート調査結果(藤井等, 1999)は、

「思い込み」や行動の「凍結」が現実には生じる現象であることを示すものである。通常は高速道路を走行するが、通行止め時にやむを得ず公共交通機関を利用した自動車利用者に対して、出発前に公共交通機関において要する旅行時間の予想値を、帰宅後に実際に費やした時間を尋ねたところ、前者の方が後者よりも有意に大きかった。これは、自動車利用者が「思い込み」を起こしている、もしくはその「思い込み」に基づいて行動の「凍結」を起こしていることを示唆している。ある程度「思い込み」が継続した後に習慣が生じるとするならば、たとえその自動車利用者が習慣によって行動を決定したとしても、彼が認知する旅行時間は「思い込み」の時間となっているはずである。これらのことから、このアンケート調査の結果は上述の「思い込み」や行動の「凍結」仮説を支持するものと考えられる。

これらの「思い込み」や行動の「凍結」という現象は、完全合理性および効用最大化仮説に基づいた離散選択モデルを適用した交通行動分析を安易に用いることに警鐘を鳴らすものである。効用最大化仮説は、効用が最大化された「状態」として行動を記述するものであり、効用関数が既知とすれば、客観的な外的情報を代入するだけで行動を記述することができる。しかし、「思い込み」が示すように行動主体の認知は客観的なものとは大きく異なる場合がある。この場合、客観的な値を代入して行動を予測すれば、系統的な誤差が生じることになる。また、行動の習慣化・「凍結」は行動主体の行動決定プロセスが効用最大化仮説とはあまりにもかけ離れたものであることを示しており、そのことによって系統的な誤りが生じる恐れがあると考えられる。ミクロなレベルで行動がどのように決定されるのかを改めて詳細に考察し、完全合理性仮説に基づく交通行動分析の是非を検討する必要があると考えられる。

### 8.4.2 行動主体の認知過程を考慮することの必要性

行動主体の「思い込み」という現象自体は、既に第6章で明らかにしたものである。本章では、それに加えて、行動の習慣化、行動の「凍結」という現象が生じることを明らかにした。「思い込み」認知は、客観的な状況と知覚状況(認知状況)が異なることを示すものである一方、本章で明らかにした行動の習慣化、「凍結」は、認知過程が短縮されることを示すものであり、行動過程が全く異なるものへ変化することを示している。客観的な状況と主観的な認知状況と異なるならば、交通行動を分析するには認知過程を考慮する必要があるだろう。また、行動の習慣化、「凍結」は効用理論が仮定する行動決定メカニズムと大きく異なるものである。したがって、我々は、交通行動がどのようなメカニズムで行われているのか、すなわち、交通行動の際の認知過程を再度、詳細に

検討する必要があると考えられる。

8.4.3 交通システムの複雑さ

既に述べた行動主体の認知過程としての習慣もしくは行動の「凍結」と「熟考」は、それぞれその行動の集積から構成される交通システムの二つの異なる状態を形成する。前者は極めて安定した状態（「凍結均衡」）である一方、後者は収束することなく、絶えず変化し続け得る。そして、前者のシステム状態が形成されるには、行動主体が「思い込み」を起こすなどの理由で交通状況が安定することが必要である。これらの数値実験結果は、行動主体が限定合理的である時、交通システムは、構造的に全く異なった複数の状態を採ることが可能で、時にはそれが移り変わるという動的で複雑なシステム、すなわち、複雑系であることを示している。第6章では、既に交通システムが複雑系であると述べているが、本章では、交通システムには構造的に全く異なった複数の状態が

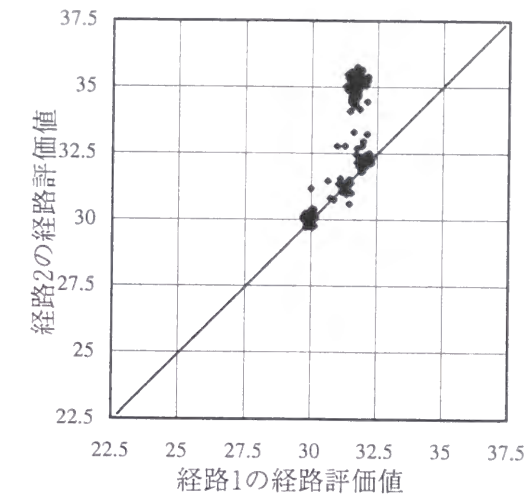


図 8.9.1 ケース 1 の 10 日目の散布図

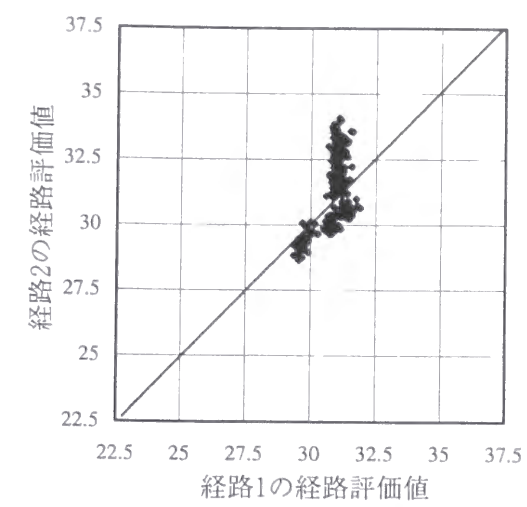


図 8.9.2 ケース 1 の 20 日目の散布図

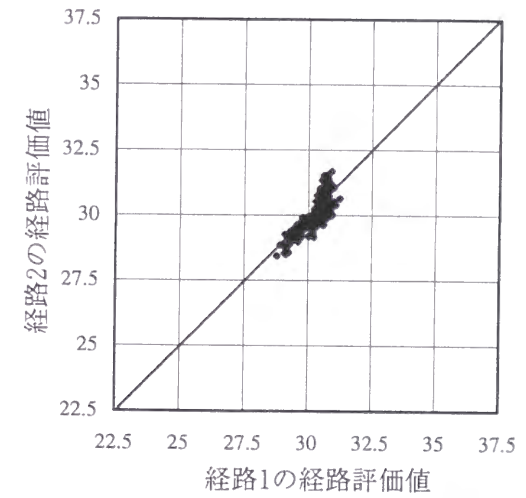


図 8.9.3 ケース 1 の 30 日目の散布図

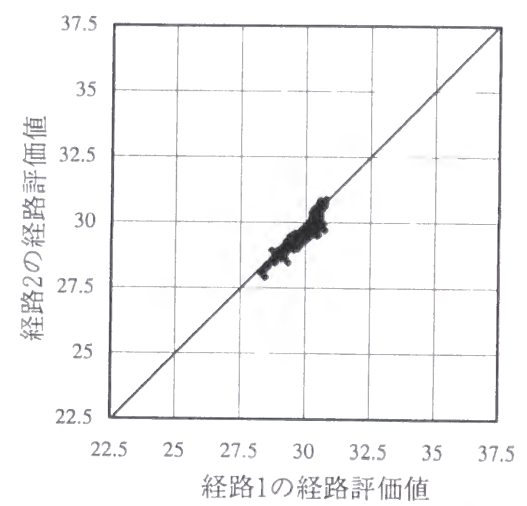


図 8.9.4 ケース 1 の 40 日目の散布図

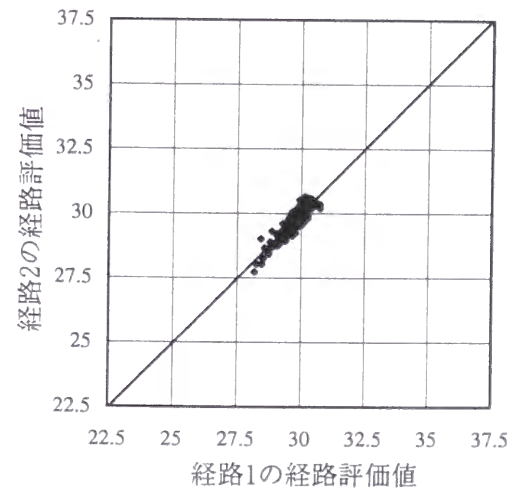


図 8.9.5 ケース 1 の 50 日目の散布図

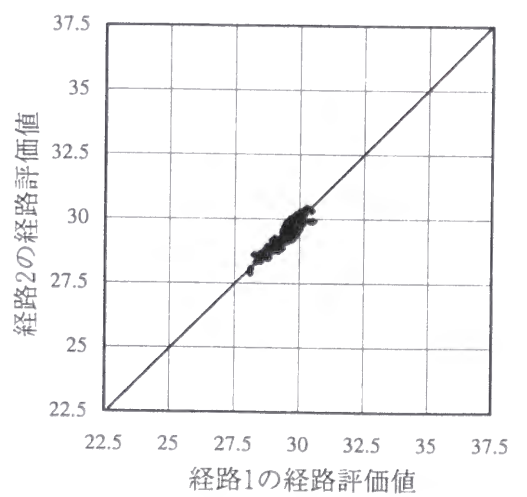


図 8.9.6 ケース 1 の 60 日目の散布図



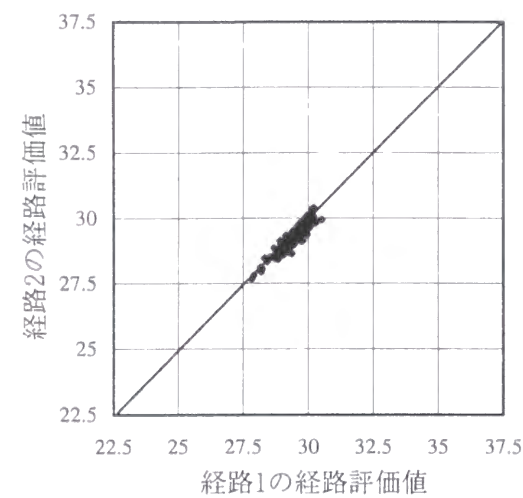


図 8.9.7 ケース 1 の 70 日目の散布図

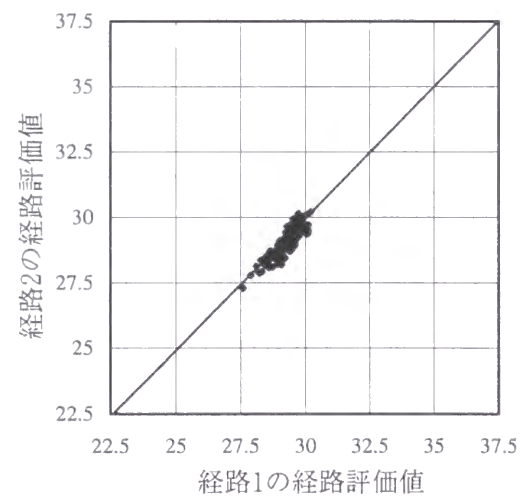


図 8.9.8 ケース 1 の 80 日目の散布図

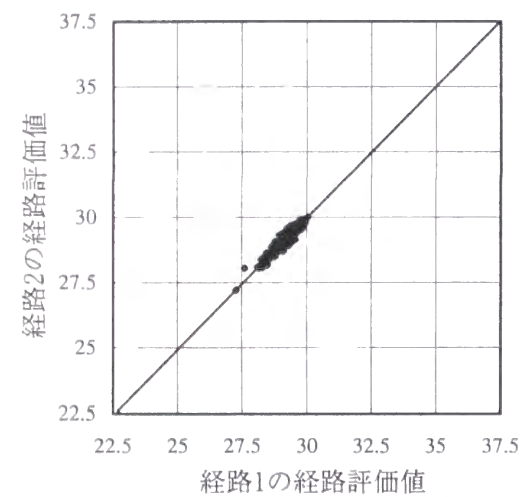


図 8.9.9 ケース 1 の 90 日目の散布図

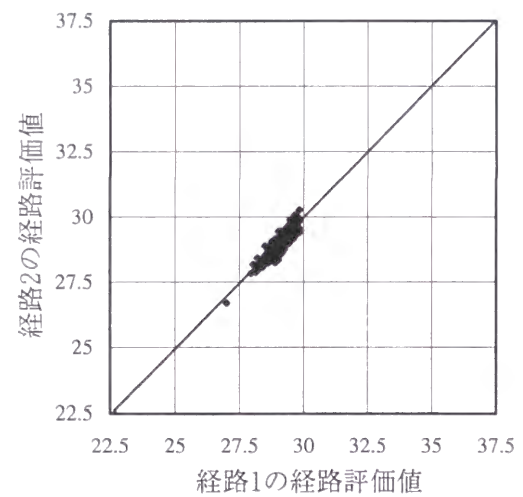


図 8.9.10 ケース 1 の 100 日目の散布図

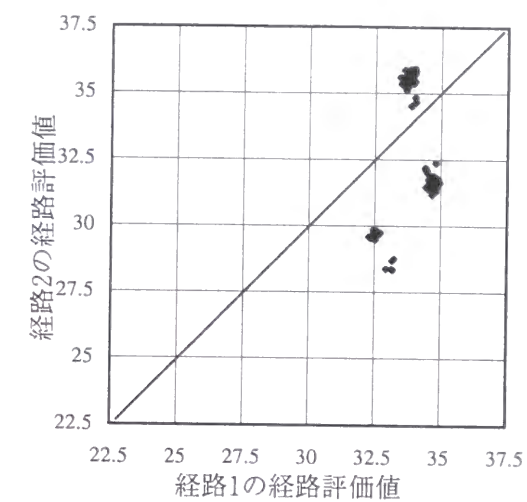


図 8.10.1 ケース 4 の 10 日目の散布図

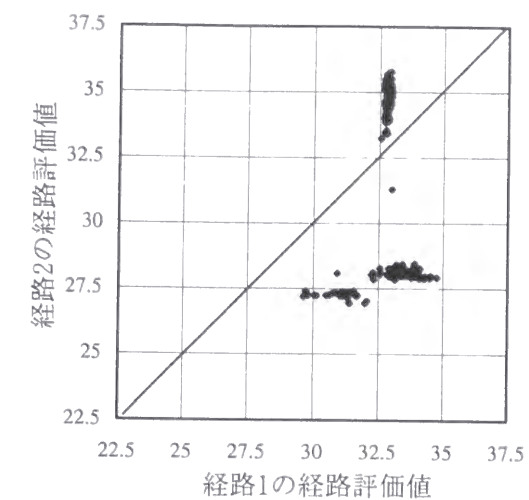


図 8.10.2 ケース 4 の 20 日目の散布図

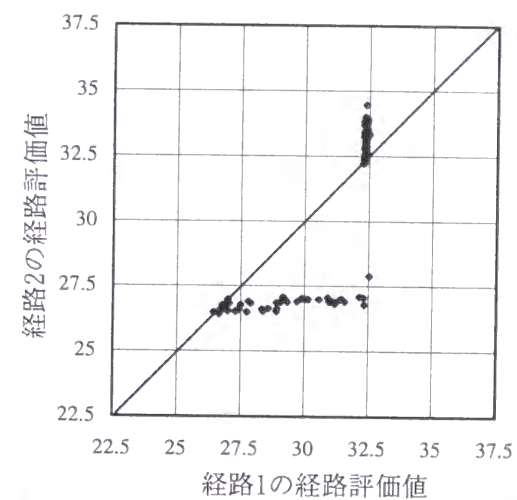


図 8.10.3 ケース 4 の 30 日目の散布図

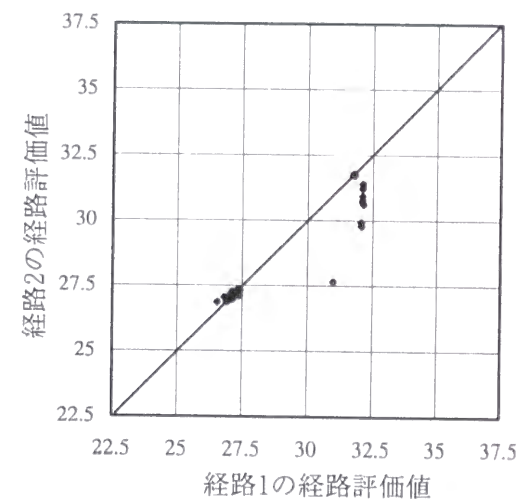


図 8.10.4 ケース 4 の 40 日目の散布図

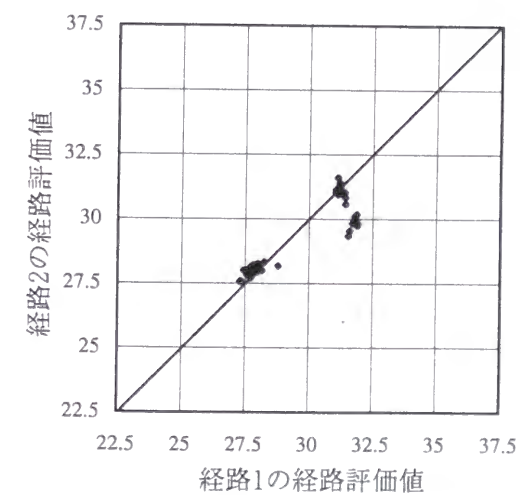


図 8.10.5 ケース 4 の 50 日目の散布図

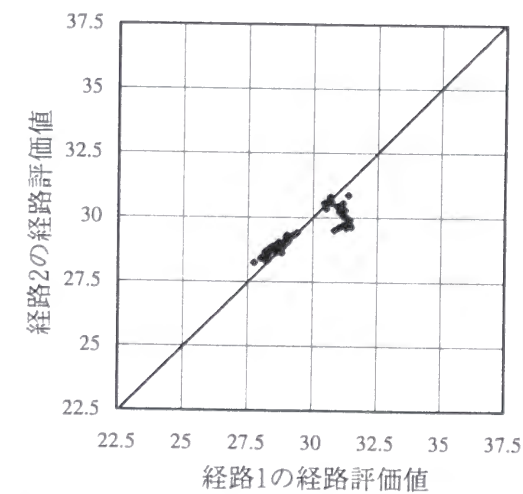


図 8.10.6 ケース 4 の 60 日目の散布図

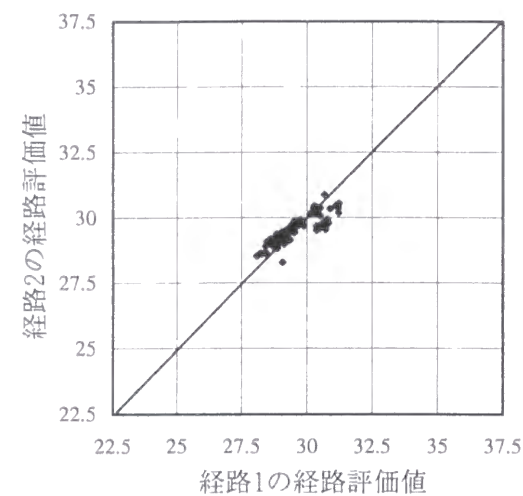


図 8.10.7 ケース 4 の 70 日目の散布図

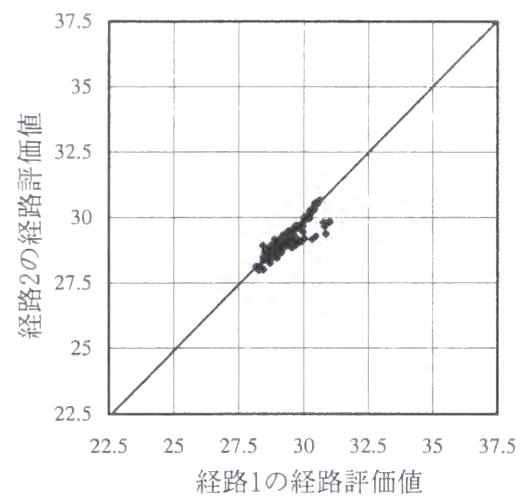


図 8.10.8 ケース 4 の 80 日目の散布図

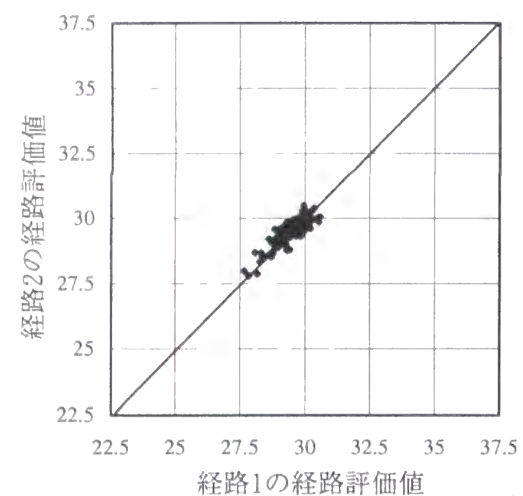


図 8.10.9 ケース 4 の 90 日目の散布図

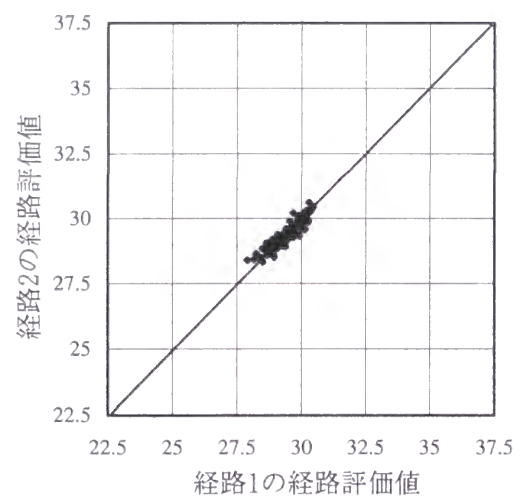


図 8.10.10 ケース 4 の 100 日目の散布図

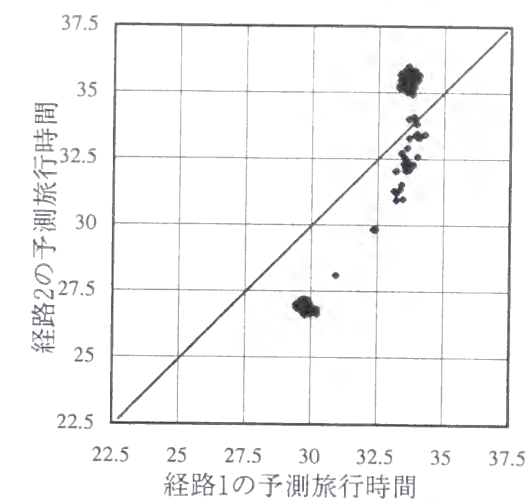


図 8.11.1 ケース 5 の 10 日目の散布図

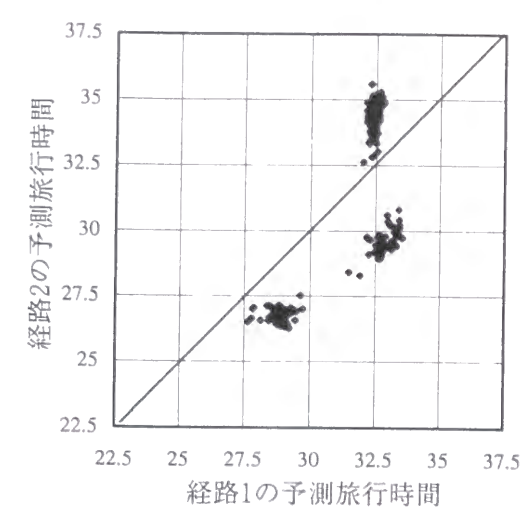


図 8.11.2 ケース 5 の 20 日目の散布図

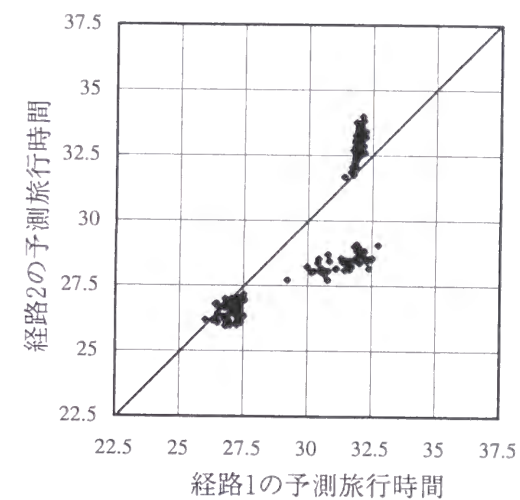


図 8.11.3 ケース 5 の 30 日目の散布図

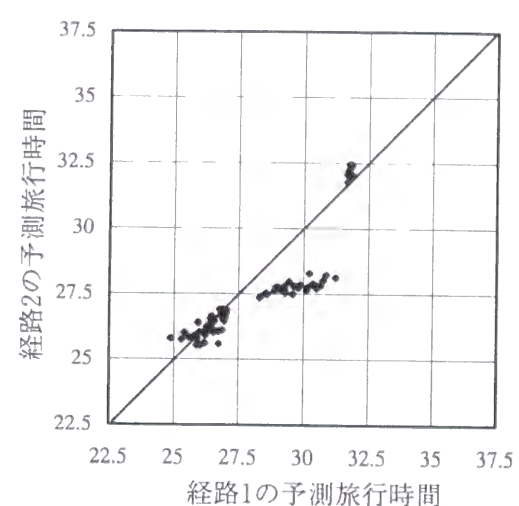


図 8.11.4 ケース 5 の 40 日目の散布図

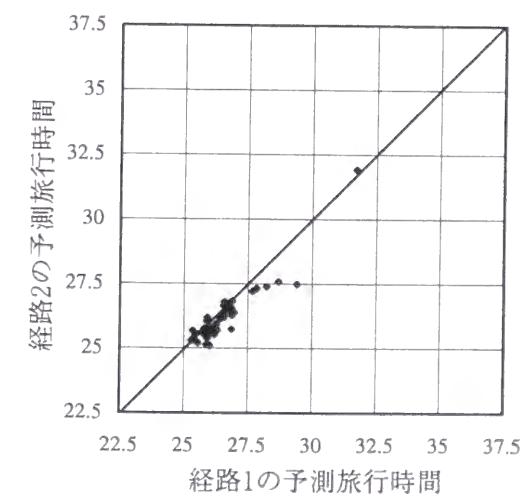


図 8.11.5 ケース 5 の 50 日目の散布図

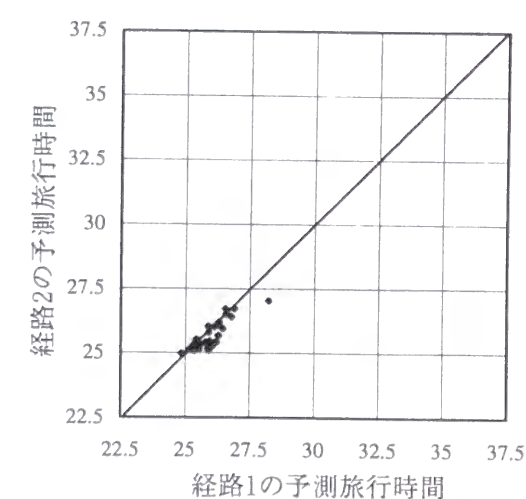


図 8.11.6 ケース 5 の 60 日目の散布図

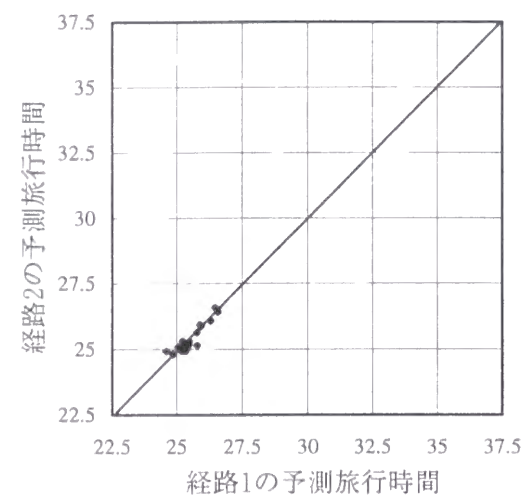


図 8.11.7 ケース 5 の 70 日目の散布図

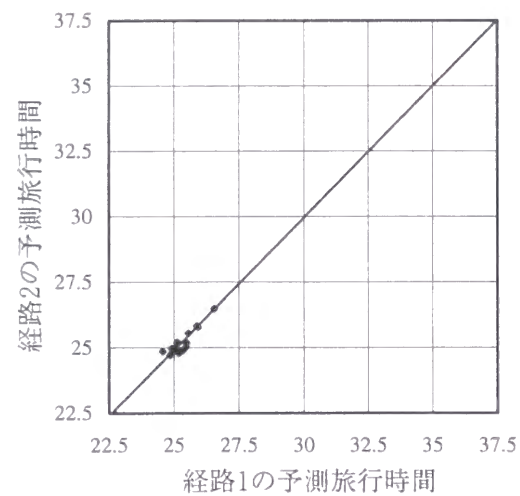


図 8.11.8 ケース 5 の 80 日目の散布図

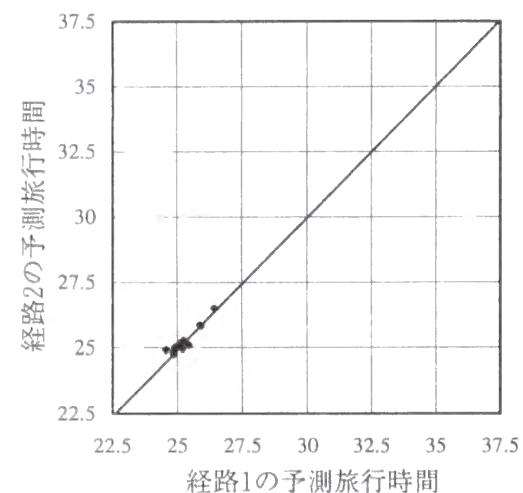


図 8.11.9 ケース 5 の 90 日目の散布図

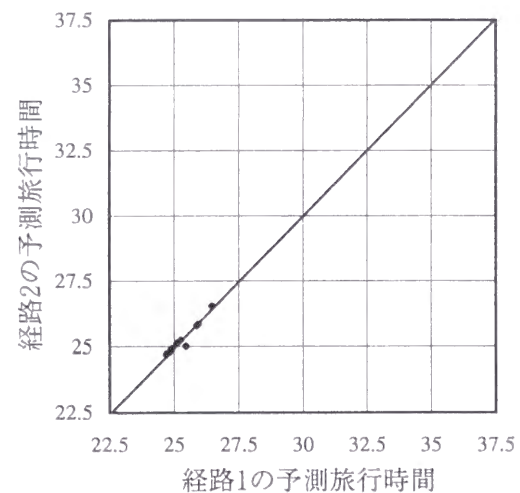


図 8.11.10 ケース 5 の 100 日目の散布図

## 参考文献

- Aarts, H., B. Verplanken and A. van Knippenberg (1997) Habit and Information Use in Travel Mode Choices, *Acta Psychologica*, vol.96, pp.1-14.
- Banister, D. (1978) The Influence of Habit Formation on Modal Choice- A Heuristic Model, *Transportation*, vol.7, pp.19-33.
- Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual, Urban Planning Division, U. S. Department of Commerce, Washington D. C.
- Cheng, P. W. and K. J. Holyoak (1985) Pragmatic Reasoning Schemas, *Cognitive Psychology*, vol.17, pp.391-416.
- 藤井聡, 中野雅也, 北村隆一, 杉山守久 (1999) 自動車通勤ドライバーの公共交通機関の思い込み認知とその改善についての実証的研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 4 部, pp.636-637.
- Goldberg, D. G. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Massachusetts.
- Goodwin, P. B. (1977) Habit and Hysteresis in Mode Choice, *Urban Studies*, vol.14, pp.95-98.
- Katona, G. (1951) Psychological Analysis of Economic Behavior, McGraw-Hill, New York, 1951.
- Kornai, J. (1971) Anti-Equilibrium, North-Holland, Amsterdam. (岩城博司ら訳 (1975) 反均衡の経済学, 日本経済新聞社, 東京.)
- Holland, J. H. (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence, University of Michigan Press, Ann Arbor. (嘉数侑昇監訳 (1999) 遺伝アルゴリズムの理論: 自然・人工システムにおける適応, 森北出版, 東京.)
- Holland, J. H, K. J. Holyoak, R. E. Nisbett and P. R. Thagard (1986) Induction- Processes of Inference, Learning, and Discovery, MIT Press, Cambridge. (市川伸一他訳 (1991) インダクションー推論・学習・発見の統合理論へ向けて, 新曜社, 東京.)
- Horowitz, J.L. (1984) The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-Link Transportation Network, *Transportation Research*, vol.18B, pp.13-28.
- 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏 (1989) 経路選択行動の動態変化に関するシミュレーション分析, 土木計画学・講演集, No.12, pp.29-36.
- Johnson-Laird, P. N. (1983) Mental Models- Towards a Cognitive Science of Language, Inference and Consciousness, Cambridge University Press, Cambridge. (海保博之監訳



(1988) メンタルモデル：言語・推論・意識の認知科学，産業出版，東京．)

Lewin, K. (1958) Group Decision and Social Change, Readings in Social Psychology, E. E. Maccoby et al. eds., Henry Holt and Company, New York, pp.197-211.

中山品一朗，北村隆一（1999）適応的エージェントによる交通システムシミュレーション，土木計画学研究・講演集，No.22 (2)，pp.873-876.

Shoichiro Nakayama and Ryuichi Kitamura (2000) A Route Choice Model with Inductive Learning, To be presented at the 79<sup>th</sup> annual meeting of Transportation Research Board.

Newell, A. & H. A. Simon (1972) Human Problem Solving, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Verplanken, B., H. Aarts, A. van Knippenberg, and C. van Knippenberg (1994) Attitude versus General Habit: Antecedents of Travel Mode Choice, Journal of Applied Social Psychology, vol.24, pp.285-300, 1994.

Verplanken, B., H. Aarts, and A. van Knippenberg (1997) Habit, Information Acquisition, and the Process of Making Travel Mode Choice, European Journal of Social Psychology, vol.27, pp.539-560.

## 第9章 結論

### 9.1 本研究で得られた成果

従来までの交通ネットワークの均衡分析では，交通システムは均衡という一つの「状態」として記述されてきた．一方，本研究では，そのような均衡の成立を前提とはせず，日々学習する行動主体から形成される交通システムの day-to-day dynamics および経路選択行動の挙動について考察することを目的としている．そのために行動主体の学習を含む認知過程を考慮した経路選択モデルを構築した上でシミュレーション分析を行った．そして，交通システムでは均衡は成立するのか，また，均衡という「状態」として交通システムを記述することは適切であるのか，という問題を検討するとともに，均衡分析によって捉えることの出来ない交通システムのメカニズムや諸性質を明らかにすることを試みた．

以下に，各章ごとに得られた成果をまとめる．

交通システムにおけるネットワーク均衡の概念はこれまで交通システムの理論的分析に大きな貢献をしてきたとともに，様々なモデルの構築が可能なシミュレーション・モデルに対してはノルム（基準）としての役割を果たしてきた．第2章では，まず，これまでに提案されてきたネットワーク均衡を整理し，そして，本研究で構築したシミュレーション・モデルに対してノルムとなるネットワーク均衡の概念を提案した．

第3章では，交通システムにおける day-to-day dynamics に関する既往の研究を，解析モデル，シミュレーション，室内実験，実地調査および実地実験に分類して整理した．このような既往研究の整理の上で，第6章では経路選択モデルを構築している．

均衡分析において，交通システムを均衡という「状態」として記述することができるのは，行動主体の行動に対して効用最大化もしくは完全合理性を仮定するからである．つまり，このような仮定を設けることによって行動主体の行動自体が，効用が最大化された「状態」として記述することが可能となり，その集積である交通システムも「状態」として記述することができた．しかし，人間の合理性は完全ではなく，限定されたものである（Simon, 1947）．第4章では，限定合理性の概念について説明するとともに，一般的にそのような行動主体の行動の記述には認知過程を考慮することが必要であることを説明した．そして，これまで認知心理学における研究から記憶システムを中心に人間の認知過程について整理した．ここで，第4章では認知心理学で

の研究の一部を説明したに過ぎず、学習を含んだその他の認知過程モデルとして、神経回路網を参考にした並列分散処理型の情報処理モデル（PDP モデル）（Rumelhart & McClelland, 1986）をはじめとして様々な研究がなされていることを併記する。

行動主体の認知過程を考慮した交通システムは、均衡分析のように一意な均衡解を持つという静的で単純なシステムではなく、動的で複雑なシステム（複雑系）であると考えられる。第 5 章では、近年、注目されている複雑系に関して述べるとともに、その解析で用いられるシミュレーションについて説明した。第 5 章により本研究では交通システムをどのように取り扱うのか、等について一つの方向性を示すことができたと考えられる。

第 6 章から第 8 章では、実際に行動主体の認知過程を考慮した経路選択モデルを構築した上でシミュレーション分析を行うことによって、交通システムの day-to-day dynamics および経路選択行動の行動に関する考察を行った。

第 6 章では、第 3 章で述べた従来から頻繁に用いられてきた行動主体の知覚旅行時間（予測旅行時間）モデル（e.g. Horowitz, 1984; 飯田等, 1989）に遺伝的アルゴリズムを適用することによって発展させた経路選択モデルを構築した上で、交通システムや経路選択行動の挙動に関してシミュレーションにより考察した。数値実験の結果、交通システムは、最終的には定常状態に収束するものの、その状態はシステム内の行動主体の異質性によって分岐するとともに、経路依存性（path-dependence）をもつなど均衡分析ではあまり取り扱われなかった「複雑」な性質があることが示された。当然ながら、システムの挙動は経路選択モデルの妥当性に依存しているものである以上、経路選択モデル、行動仮説の吟味について実証的研究と理論的研究を繰り返す必要があるが、上述のように、交通システムに複雑な性質があること、その一方で、新たな収束点（均衡点）としての「思い込み均衡」という従来では指摘されていなかった状態での安定した均衡が存在する可能性があることが示されたのは、第 6 章の成果であったと考えられる。

不確実性下においては、人間は簡便法とも言えるヒューリスティクス（heuristics）を用いるとされる（Tversky & Kahneman, 1974）。経路選択時でも、行動主体は必ずしも知覚旅行時間（予測旅行時間）を算出した上で経路選択を行うとは限らず、もっと単純な方法で経路を選択していると考えられる。第 7 章では、そのようなヒューリスティクスを考慮した経路選択モデルを構築した上で、交通システムや経路選択行動の挙動に関して考察した。数値実験の結果、交通システムは過去の経験を考慮する行動主体が過半数を占める比較的安定的な状態とランダムに経路選択する行動主体が比較的多い不安定な状態の 2 種類があることが分かった。前者の状態では多く行動主体は

「思い込み」を起こしているため、安定な状態となっていた。また、数値実験結果では、経路間の旅行時間の経時的平均は異なり、等時間原則が必ずしも成立するとは限らないことが分かった。

第 8 章では、第 4 章で述べた認知過程における帰納（Holland et al., 1986）に基づいた経路選択モデルを構築し、交通システムや経路選択行動の挙動に関して考察した。数値実験の結果、経路選択行動に関して、1) 初期に旅行時間の大きな変動が起こるため、それを経験した行動主体は「思い込み」を起こす、2) 「思い込み」は行動主体が「気まぐれ」に経路を変更することによって解消され得る、3) 行動主体が「気まぐれ」を起さず、「思い込み」の状態がある程度続くと、ある一方の経路を走行し続けるという行動が習慣化し、他の経路を選択するということが検討すらされなくなり、行動が「凍結」される、また、交通システムに関しては、統計学的に利用者均衡には収束することはなかった、という結果が得られた。これらの数値実験は、交通システムは、全く異なった複数の状態（「思い込み」を起こした行動主体が多数を占める状態、習慣・行動の「凍結」を起こした行動主体が多数を占める状態、多数の行動主体は試行錯誤しながら熟考し続けるため常に変化し続ける状態）を持ち、時にはそれ等の間を移行するという動的で複雑なシステムであることを示している。

## 9.2 本研究が示した交通システム分析のための視点

本研究では動的で複雑なシステムである交通システムをシミュレーションによって考察してきた。一般に複雑系は、ある一つの法則、理論によって全てを取り扱うことは困難であり、逆に、そのように捉えることができないシステムが複雑系であるとも考えられる。本研究で明らかにした交通システムのメカニズムや諸性質も部分的なものであり、必ずしも統一的・体系的なものとなっていないと考えられる。しかしながら、本研究が新しい視点から交通システムを捉えようと試み、いくらかの知見を得たことは非常に意義深いと考えられる。本研究では、交通システムを捉えるためには以下のような視点が重要であることを主張する。

### 9.2.1 認知過程の考慮

本研究では認知過程を記述した経路選択モデルを構築した上で、交通システムの day-to-day dynamics および経路選択行動について考察した。その結果、行動主体は客

観的な状況と全く異なる認知状態である「思い込み」が生じることが明らかとなった。この知見は行動主体の認知状態を明示的に考慮する必要があることを示唆している。さもなくば、行動の記述に際して系統的な誤差を生む可能性がある。また、第8章で明らかにした行動の習慣化、もしくは行動の「凍結」は、行動主体が同じ行動を繰り返すことによって思考プロセスを省略することを意味している。このような行動主体の認知過程は効用最大化仮説に基づいた行動モデルとかけ離れたものであり、効用理論に基づいた行動モデルを用いることは行動の記述に際して系統的な誤差を生む可能性がある。以上のように交通行動を記述するには行動主体の認知過程を考慮する必要があると考えられる。したがって、今後、行動における認知過程について詳細に分析することが必要であろう。

### 9.2.2 複雑系としての交通システム

従来から用いられてきた均衡分析では、交通システムは均衡という一つの状態として記述されてきた。既に述べたようにそのために均衡分析では理想的な行動主体を仮定している。このような均衡分析のアプローチは、解析的に取り扱える程に単純に交通システムを記述しようとするものである。一方、本研究では、必ずしも交通システムを単純に捉えようとはせず、行動主体により現実的な仮定を設けた上で、交通システムを記述してきた。その結果、第6章では、多くの行動主体が実際とは異なる認知状態（思い込み認知）となることによって「思い込み均衡」（deluded equilibrium）という複数均衡でかつ経路依存性（path-dependent）状態に収束し得ることが分かった。第8章では、「思い込み均衡」を含む安定的な状態がある一定期間持続すると、多くの行動主体は行動を習慣化させ、行動を変更しようなどとは全く考えなくなり、交通システムはより強固に安定的な「凍結均衡」となることが分かった。以上のような「思い込み均衡」や「凍結均衡」は従来までのネットワーク均衡と全く異なるメカニズムによって形成された均衡概念であり、経路依存性など「複雑な」性質を持っている。また、第7章や第8章で示したように、交通システムは必ずしも安定性の高い均衡状態に収束するとは限らず、不安定な状態で定常となることもあり、その場合、一度そのような不安定な状態となると、交通環境が大きく変化することなどなければ二度と「思い込み均衡」など安定的な状態へは遷移することがない。以上のように本研究では均衡分析よりも現実的な行動主体を仮定した場合、交通システムは均衡分析が記述するような単純なシステムではなく、もっと複雑で動的なシステム（複雑系）であることが分かった。本研究はシミュレーションによる研究であり、実証的研究に

よって以上のような知見を確認する必要があるものの、現実的な仮定の下では交通システムが単純系ではなかったことは交通システムを複雑系として捉える必要があることを示唆していると考えられる。少なくとも、今後、複雑系として交通システムを捉えるべきか、を真摯に研究することの必要性は指摘したと考えられる。

### 9.3 今後の課題

本研究で得られた知見は、非常に単純な設定の中でシミュレーションによって得られたものである。シミュレーションによる研究では、均衡分析のように体系的・統一的に交通システムを把握することはできないため、今後、初期条件を変更したり、様々な条件（例えば、出発時刻選択の考慮など）を付加したモデルを構築し、知見を蓄積することで、交通システムの全体像を明らかにすることが必要であると考えられる。

また、「思い込み」や行動の「凍結」などの交通行動現象の実証的研究を行うことも今後の課題である。本研究では、「思い込み均衡」や「凍結均衡」という知見が得られたが、このような交通システムではどのような性質・メカニズムの均衡が成立するのか、というようなマクロ的な知見を実証的に検討することは非常に困難である。人間の行動や認知過程がどのようなものであるのか、ということの実証的な検討の方がはるかに容易である。今後、行動主体の「思い込み」や習慣化（行動の「凍結」）が実際に生じるものであるのか、を検討することによって、間接的にはなるが、本研究で得られた知見の信頼性を向上させることができると考えられる。



## 参考文献

- Holland, J. H, K. J. Holyoak, R. E. Nisbett and P. R. Thagard (1986) Induction- Processes of Inference, Learning, and Discovery, MIT Press, Cambridge. (市川伸一他訳 (1991) インダクションー推論・学習・発見の統合理論へ向けて, 新曜社, 東京.)
- Horowitz, J.L. (1984) The Stability of Stochastic Equilibrium in a Two-Link Transportation Network, Transportation Research, vol.18B, pp.13-28.
- 飯田恭敬, 内田敬, 宇野伸宏 (1989) 経路選択行動の動態変化に関するシミュレーション分析, 土木計画学・講演集, No.12, pp.29-36.
- Rumelhart, D. E. and J. L. McClelland eds. (1986) Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, vol.1-2, MIT Press, Cambridge. (甘利俊一監訳 (1989) PDP モデル: 認知科学とニューロン回路網の探索, 産業出版, 東京.)
- Simon, H. A. (1947) Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Process in Administrative Organization, Macmillan, New York. (松田武彦, 高柳暁, 二村敏子訳 (1965) 経営行動: 経営組織における意思決定プロセスの研究, ダイヤモンド社, 東京.)
- Tversky, A. and D. Kahneman (1974) Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, Science, vol.185, pp.1124-1131.

## 謝辞

本論文を結ぶにあたり, 本研究を遂行する上でご指導とご援助をいただいた方々に感謝の意を表したい。

京都大学大学院工学研究科北村隆一教授には, 筆者が研究室に配属して以来, 終始暖かいご指導とご教鞭をいただいた。本研究の構想から, 遂行にわたって常に熱意をもってご指導していただいた。特に, 問題を捉える視点等のご教示は研究を遂行する上での土台となった。甚大なる感謝の意を表します。京都大学工学研究科藤井聡助手には, 本研究を遂行するにあたり, 内容のみならず, 文章の書き方等を含め, 多くの時間を費やし, 微細な点までご指導していただいた。深く感謝いたします。京都大学工学研究科山本俊行助手には, 様々にご助言していただいたことに感謝いたします。

東北大学大学院工学研究科内田敬助教授には, 筆者が学部・修士課程時代に直接的なご指導をいただいた。経路選択行動への問題意識等の基礎が培われた。深く感謝いたします。

京都大学大学院土木システム工学専攻交通システム分野の諸先輩・諸兄には多くの貴重なお意見をいただくとともに, 研究遂行にご協力いただいた。特に, 菊池輝先輩には, 計算機の設定等準備していただいた。心から感謝いたします。

ここに記しきれない多くの方々の学恩, ご支援によって本研究がなされたことを銘記し, 深く感謝いたします。